



Universidade de Aveiro

2011

Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática

**MÍRIAM MARTÍNEZ
BÁEZ**

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DA INFORMAÇÃO
ESPACIAL-TEMPORAL DO CANAL RÁDIO**



Universidade de Aveiro

2011

Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática

**MÍRIAM MARTÍNEZ
BÁEZ**

ESTUDO EXPLORATÓRIO DA INFORMAÇÃO ESPACIAL-TEMPORAL DO CANAL RÁDIO

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Armando Carlos Domingues da Rocha, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro, e da Mestre Susana de Jesus Mota, Assistente Convidada da Universidade de Aveiro

À meus pais, irmãos a minha avó Ubaldina e a Jose

O júri

Presidente

Prof. Dr. João Nuno Pimentel da Silva Matos

Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Victor Daniel Neto dos Santos

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia
Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Dr. Armando Carlos Domingues da Rocha

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Mestre Susana de Jesus Mota

Assistente Convidada da Universidade de Aveiro (Co-orientadora)

Agradecimentos

Aos meus orientadores da Universidade de Aveiro, à Mestre Susana Mota e o Dr. Armando Rocha, por dar-me a oportunidade de trabalhar e confiar em mim e aprender com vocês e pela inestimável atenção e ajuda prestada.

Ao meu orientador da Universidade de Vigo, o Dr. Fernando Pérez Fontán, por oferecer-me esta grande oportunidade de realizar-me e aprender com outros, e por seguir confiando em mim e dar-me o seu apoio, e ser sincero e justo. Agradeço ainda por me explicar a engenharia das comunicações desde um ponto de vista prático.

Aos meus amigos, os que conheci durante esta experiência, por fazer-me disfrutar de Aveiro, a Maura por ajudar-nos sem apenas conhecer-nos e seguir aí. Aos meus amigos da Universidade de Vigo pelos grandes momentos que compartilhámos. Às minhas amigas de sempre, pelo seu apoio, a sua confiança e por divertir-me com vocês.

Ao meu companheiro de relevos nesta largo trajecto de obstáculos, e o meu melhor companheiro na vida, obrigada por ajudar-me sempre, cuidar-me, divertir-me, confiar em mim, entender-me e todas as outras coisas que não entrariam aqui, por que não há espaço suficiente. Também por seguir planeando juntos novos objetivos e fazer-me sempre tudo mais fácil. Os teus pais, por ajudar-nos sempre e tratar-me assim.

À minha família, por ajudar-me nos momentos complicados, aos meus pais por entender que o caminho era longo, pela confiança depositada em mi e o seu sacrifício em todos os sentidos e sobre todo o carinho demonstrado em todos estes anos. A minha irmã Silvia e o meu irmão Antonio, por ter paciência e ser carinhosos comigo. Muito obrigada, espero ser como esperáveis que fosse!

Palavras-chave Clustering, Índices de Validação, FD-SAGE, KPM, Canal Rádio, Direccional, MIMO, SIMO, Multipercurso.

Resumo Nas últimas décadas o aumento das taxas de transmissão junto com o aumento dos usuários provocou a compartição do espectro, ademais da necessidade de melhorar os serviços. Caracterizar e conhecer o canal rádio é imprescindível, para cumprir os objectivos demandados.

O objectivo deste projecto é criar um modelo que seja capaz de caracterizar o canal rádio, é dizer, conhecer os ângulos de chegada, o atraso assim como os obstáculos que provocam multipercurso. Para lograr isto, empregaram-se algoritmos de elevada resolução para a estimação de parâmetros, junto com técnicas de *clustering*.

A primeira parte do projecto consistiu na geração de dados sintéticos que simulam o canal rádio, para determinar o desempenho dos índices de validação do *clustering*.

Seguidamente utilizando os dados obtidos das medições reais e aplicando as técnicas de *clustering*, representaram-se graficamente, analisando os resultados de forma visual e estatística. Finalmente conseguimos classificar o tipo de reflexões acontecidas em diferentes cenários.

Com o propósito de criar um modelo que caracterize o canal radio, realizou-se um estudo completo sobre o atraso, azimuth.

Keywords Clustering, Validity Index, FD-SAGE, KPM, Channel Radio, Directional, MIMO, SIMO, Multipath.

Abstract In the last decades the transmission rates and the number of wireless users increased very fast. that the developments imposed the sharing of the spectrum and also the necessity to improve the QoS. Characterizing the radio channel in time, amplitude, frequency and space is important to obtain increasing data rates from the existing spectrum without increasing bandwidths and radiated power.

The objective of this project is to create a model that represents and characterizes the radio channel to know the angle of arrival, the delay and also the obstacles that causes the multipath. To achieve this, high resolution algorithms are used for the estimation of the parameters and also clustering techniques.

In the first part of this project, synthetic data were generated, to simulate the radio channel to determine the functioning of the clustering validity index.

Immediately afterwards, information obtained from the real measurements were used with clustering techniques. It was represented as graphics to do a statistical and visual analysis. Finally the multipath components measured in different environments can be classified. As last step, a complete study about the delay and the azimuth was done to parameterize a model.

Palabras Clave Clustering, Índices de Validación, Datos Sintéticos, FD-SAGE, KPM, Canal Radio, Direccional, MIMO, SIMO, Multitrayecto.

Resumen En las últimas décadas el aumento de las tasas de transmisión junto con el incremento del número de usuarios, provocó la compartición del espectro, además de la necesidad de mejorar los servicios. Caracterizar y conocer el canal radio es imprescindible, para lograr los objetivos demandados.

El objetivo de este proyecto es crear un modelo que sea capaz de caracterizar el canal radio, es decir, conocer los ángulos de llegada y el retardo, así como los obstáculos que provocan el multitrayecto. Para conseguir esto, se utilizaron algoritmos de elevada resolución para la estimación de los parámetros, junto con técnicas de *clustering*.

La primera parte de este proyecto consistió en generar datos sintéticos que simulan el canal radio para determinar el funcionamiento de los índices de validación del *clustering*.

Por último, con el propósito de crear un modelo que caracterice el canal radio, se hizo un estudio completo sobre el retardo y el azimut.

Índice temático

ÍNDICE DE TABELAS.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	IX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO.....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
1.3 TRABALHO PRÉVIO	2
1.4 RESUMO CAPÍTULO A CAPÍTULO.....	3
2. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL RÁDIO.....	5
2.1 INTRODUÇÃO O CANAL RÁDIO	5
2.1.1 <i>Propagação em espaço livre</i>	5
2.2 MECANISMOS BÁSICOS	7
2.2.1 <i>Caracterização dos canais multipercurso</i>	9
2.3 CANAL SIMO E MIMO	11
2.3.1 <i>Potencialidades dos Sistemas MIMO</i>	14
2.3.2 <i>Modelo para caracterizar o canal direccional</i>	15
3. TRATAMENTO E ANÁLISE DA INFORMAÇÃO	17
3.1 ALGORITMO SAGE E FD-SAGE	18
3.2 ALGORITMOS DE <i>CLUSTERING</i>	20
3.3 MEDIDAS DE VALIDAÇÃO PARA O <i>CLUSTERING</i> E TÉCNICAS DE FUSÃO	23
3.4 RESULTADOS DAS MEDIDAS DE VALIDAÇÃO EM DADOS SINTÉTICOS.....	29
3.4.1 <i>Geração de dados sintéticos a partir da extensão do Modelo Saleh-Valenzuela</i>	29
3.4.2 <i>Resultados do KPM a partir de dados sintéticos</i>	30
3.4.3 <i>Estatísticas sobre o funcionamento das medidas de validação</i>	31
4. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DAS MEDIDAS REAIS.....	37
4.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CANAL RÁDIO	38

4.1.1	<i>Cenário interior e interior-exterior</i>	39
4.2	RESULTADO DO FD-SAGE PARA OS DADOS REAIS.....	41
4.2.1	<i>Resultado do FD-SAGE para o cenário interior</i>	41
4.2.2	<i>Resultado do FD-SAGE para o cenário interior-exterior.....</i>	44
4.3	RESULTADOS DO KPM E DAS MEDIDAS DE VALIDAÇÃO E OS ÍNDICES DAS TÉCNICAS DE FUSÃO.	46
4.3.1	<i>Resultado dos índices de validação e o KPM para o cenário interior.....</i>	48
4.3.2	<i>Resultado dos índices de validação e o KPM para o cenário interior-exterior</i>	52
4.4	COMPORTAMENTO DAS REFLEXÕES DOS RAIOS.....	57
4.4.1	<i>Representação mediante elipses para o cenário interior.....</i>	60
4.4.2	<i>Representação mediante elipses para o cenário interior-exterior</i>	66
5.	ESTUDOS POSTERIORES	71
5.1	ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO ATRASO, DA POTÊNCIA E DO AZIMUTE PARA OS <i>CLUSTERS</i> E PARA AS MPCs.....	71
5.2	RESOLUÇÃO DO SAGE PARA OS CASOS COM LOS E NLOS.....	77
6.	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS.....	83
	ANEXO	87

Índice de Tabelas

TABELA 3-1 PERCENTAGENS DOS ÍNDICES DE VALIDAÇÃO	33
TABELA 3-2 PERCENTAGENS DOS ÍNDICES DAS TÉCNICAS DE FUSÃO	34
TABELA 4-1 COORDENADAS TX-RX PARA O CENÁRIO INTERIOR.....	40
TABELA 4-2 COORDENADAS TX-RX PARA O CENÁRIO INTERIOR-EXTERIOR.....	40
TABELA 4-3 ÍNDICES DE VALIDAÇÃO E Nº DE <i>CLUSTERS</i> ESCOLHIDOS PARA O CENÁRIO 1 INTERIOR.....	52
TABELA 4-4 ÍNDICES DE VALIDAÇÃO E Nº DE <i>CLUSTERS</i> ESCOLHIDOS PARA O CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR. .	56
TABELA 4-5 RESULTADOS DO ATRASO E O AZIMUTE PARA A DISTÂNCIA PERCORRIDA DO RAO DIRETO NOS CENÁRIOS 1 E 2.	57
TABELA 4-6 INFORMAÇÃO NECESSÁRIA PARA A INTERPRETAÇÃO DOS GRÁFICOS DAS ELIPSES.....	58
TABELA 4-7 RESULTADOS DOS EMPARELHAMENTOS DAS ELIPSES PARA O CENÁRIO1, DEPOIS DE APLICAR AS FILTRAGENS EM ATRASO E AZIMUTE.	62
TABELA 4-8 RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS CENTROIDES DO CENÁRIO 1 (DIRETO) COM LOS.....	64
TABELA 4-9 RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS CENTROIDES DO CENÁRIO 1 (REVERSO) COM LOS.....	64
TABELA 4-11 RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS CENTROIDES DO CENÁRIO 2 (DIRETO) COM N LOS.	70
TABELA 4-12 RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS CENTROIDES DO CENÁRIO 2 (REVERSO) COM NLOS.	70

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 EXEMPLO DE COMO UMA ONDA SE REFLECTE AO INCIDIR NUMA SUPERFÍCIE.	7
FIGURA 2.2 EXEMPLO DE UMA COMUNICAÇÃO ENTRE TRANSMISSOR E RECEPTOR USANDO UM SISTEMA MIMO.	13
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE FLUXO DO ALGORITMO SAGE.	19
FIGURA 3.2 GRÁFICO DAS ESTIMATIVAS DO FD-SAGE PARA UM EXEMPLO REAL.	20
FIGURA 3.3 EXEMPLO DUM CANAL REAL.....	26
FIGURA 3.4 SOLUÇÃO ÍNDICE D53 COM $K=6$ CLUSTERS, PARA A FIGURA 3.3.....	27
FIGURA 3.6 SOLUÇÃO ESCOLHIDA PELOS ÍNDICES XB E D53 PARA A FIGURA 3.3.	28
FIGURA 3.7 SOLUÇÕES OBTIDAS MEDIANTE AS TÉCNICAS DE FUSÃO.	28
FIGURA 3.8 ILUSTRAÇÃO DO DECAIMENTO EXPONENCIAL DA AMPLITUDE DOS CLUSTERS E DO DECAIMENTO DOS RAIOS DENTRO DOS CLUSTERS.	30
FIGURA 3.9. PERCENTAGEM DO ÍNDICE XB.....	32
FIGURA 3.10 PERCENTAGEM DO ÍNDICE D33.....	32
FIGURA 3.11 PERCENTAGEM DOS ÍNDICES XB, D53, SF_G, SF_H, Kr.....	35
FIGURA 4.1 DIAGRAMA DO SISTEMA UTILIZADO PARA MEDIÇÕES DO CANAL DIRECIONAL.....	38
FIGURA 4.2 CENÁRIO INTERIOR 1 COM LOS.	39
FIGURA 4.3 CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR COM NLOS.	39
FIGURA 4.4 RESPOSTA IMPULSIVA E ESTIMATIVAS DO FD_SAGE NO CENÁRIO 1 INTERIOR (DIRETO) COM LOS.	41
FIGURA 4.5 ESTIMATIVAS DO FD-SAGE NO CENÁRIO 1 INTERIOR (DERETO) COM LOS.....	42
FIGURA 4.6 RESPOSTA IMPULSIVA E ESTIMATIVAS DO FD_SAGE NO CENÁRIO 1 INTERIOR (REVERSO) COM LOS.....	42
FIGURA 4.7 ESTIMATIVAS DO FD-SAGE NO CENÁRIO 1 INTERIOR (REVERSO) COM LOS.....	43
FIGURA 4.8 RESPOSTA IMPULSIVA E ESTIMATIVAS DO FD_SAGE NO CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (DIRETO) COM NLOS.	44
FIGURA 4.9 ESTIMATIVAS DO FD-SAGE NO CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (DIRETO) COM NLOS.	44
FIGURA 4.10 RESPOSTA IMPULSIVA E ESTIMATIVAS DO FD_SAGE NO CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (REVERSO) COM NLOS.....	45
FIGURA 4.11 ESTIMATIVAS DO FD-SAGE NO CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (REVERSO) COM NLOS.....	45
FIGURA 4.12 MUDANÇA DE REFERENCIAL ANGULAR.....	46
FIGURA 4.13 EXEMPLO DE DADOS REPRESENTADOS REFERIDOS AO PONTO [0,0].....	47

FIGURA 4.14 EXEMPLO DE DADOS ROTADOS REFERIDOS À RECTA QUE UNE O TX-RX.	48
FIGURA 4.15 ÍNDICE DAS TÉCNICAS DE FUSÃO PARA O CENÁRIO 1 INTERIOR (DIRETO) COM LOS.	49
FIGURA 4.16 ÍNDICE DAS CVIS PARA O CENÁRIO 1 INTERIOR (DIRETO) COM LOS.	49
FIGURA 4.17 <i>CLUSTERING</i> PARA O CENÁRIO 1 INTERIOR (DIRETO) COM LOS E K=6 <i>CLUSTER</i>	50
FIGURA 4.18 ÍNDICE DAS TÉCNICAS DE FUSÃO PARA O CENÁRIO 1 INTERIOR (REVERSO) COM LOS.	50
FIGURA 4.19 ÍNDICE DAS CVIS PARA O CENÁRIO 1 INTERIOR (REVERSO) COM LOS.	51
FIGURA 4.20 <i>CLUSTERING</i> PARA O CENÁRIO 1 INTERIOR (REVERSO) COM LOS E K=5 <i>CLUSTER</i>	52
FIGURA 4.21 ÍNDICE DAS TÉCNICAS DE FUSÃO PARA O CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (DIRETO) COM NLOS.	53
FIGURA 4.22 ÍNDICE DAS CVIS PARA O CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (DIRETO) COM NLOS.	53
FIGURA 4.23 <i>CLUSTERING</i> PARA O CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (DIRETO) COM NLOS E K=5 <i>CLUSTER</i>	54
FIGURA 4.24 ÍNDICE DAS TÉCNICAS DE FUSÃO PARA O CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (REVERSO) COM NLOS.	55
FIGURA 4.25 ÍNDICE DAS CVIS PARA O CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (REVERSO) COM NLOS.	55
FIGURA 4.26 <i>CLUSTERING</i> PARA O CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (REVERSO) COM NLOS E K=4 <i>CLUSTER</i>	56
FIGURA 4.27 GRÁFICO DE ELIPSES CENÁRIO 1 (DIRETO E REVERSO) COM LOS PARA K=6 E KRV=5.	60
FIGURA 4.28 GRÁFICO DE ELIPSES CENÁRIO 1 (DIRETO E REVERSO) COM LOS. DEPOIS DE FAZER UM EMPARELHAMENTO POR ATRASO.	61
FIGURA 4.30 GRÁFICO ELIPSES EMPARELHADAS EM ATRASO E AZIMUTE PARA O CENÁRIO 1 (DIRETO E REVERSO) COM LOS. DEPOIS DE FAZER UM EMPARELHAMENTO POR ATRASO E AZIMUTE (EMPARELHAMENTO PERFEITO EM ATRASO E EM AZIMUTE).	63
FIGURA 4.31 GRÁFICO ELIPSE EMPARELHADAS EM ATRASO E NÃO EM AZIMUTE PARA O CENÁRIO 1 (DIRETO E REVERSO) COM LOS. DEPOIS DE FAZER UM EMPARELHAMENTO POR ATRASO E AZIMUTE (EMPARELHAMENTO EM ATRASO E NÃO PERFEITO EM AZIMUTE).	65
FIGURA 4.32 GRÁFICO ELIPSE DESEMPARELHADAS EM ATRASO E EM AZIMUTE PARA O CENÁRIO 1 (DIRETO E REVERSO) COM LOS. DEPOIS DE FAZER UM EMPARELHAMENTO POR ATRASO E AZIMUTE.	65
COMO PODEMOS OBSERVAR NA FIGURA 4.33, EXISTEM ELIPSES COM O MESMO ATRASO. NALGUMAS ELIPSES O AZIMUTE COINCIDE, O QUE SUGERE QUE NESTES CASOS TEMOS UMA REFLEXÃO DE 1ª ORDEM: ESTAS SÃO AS CONTRIBUIÇÕES QUE APARECEM NA FIGURA 4.37.	66
FIGURA 4.34 GRÁFICO ELIPSES CENÁRIO 2 (DIRETO E REVERSO) COM NLOS PARA K=5 E KRV=4.	67
FIGURA 4.35 GRÁFICO ELIPSES CENÁRIO 2 (DIRETO E REVERSO) COM NLOS. DEPOIS DE FAZER UM EMPARELHAMENTO POR ATRASO.	67
FIGURA 4.36 GRÁFICO ELIPSES DESEMPARELHADAS EM ATRASO PARA O CENÁRIO 2 (DIRETO E REVERSO) COM LOS. DEPOIS DE FAZER UMA FILTRAGEM POR ATRASO.	68

FIGURA 4.37 GRÁFICO ELIPSES EMPARELHADAS EM ATRASO E AZIMUTE PARA O CENÁRIO 2 (DIRETO E REVERSO) COM NLOS. DEPOIS DE FAZER UM EMPARELHAMENTO POR ATRASO E AZIMUTE (EMPARELHAMENTO PERFEITO EM ATRASO E EM AZIMUTE).	68
FIGURA 4.38 GRÁFICO ELIPSES EMPARELHADAS EM ATRASO E NÃO EM AZIMUTE PARA O CENÁRIO 2 (DIRETO E REVERSO) COM NLOS. DEPOIS DE FAZER UM EMPARELHAMENTO POR ATRASO E AZIMUTE (EMPARELHAMENTO EM ATRASO E NÃO PERFEITO EM AZIMUTE).	69
FIGURA 4.39 GRÁFICO ELIPSES DESEMPARELHADAS EM ATRASO E EM AZIMUTE PARA O CENÁRIO 2 (DIRETO E REVERSO) COM NLOS. DEPOIS DE FAZER UM EMPARELHAMENTO POR ATRASO E AZIMUTE.	69
FIGURA 5.1 HISTOGRAMA DO AZIMUTE NORMALIZADO PARA CENÁRIO 1 (DIRETO) COM LOS.....	72
FIGURA 5.2 HISTOGRAMA DO ATRASO NORMALIZADO PARA CENÁRIO 1 (DIRETO) COM LOS.	73
FIGURA 5.3 POTÊNCIA DOS CENTROIDES VS. ATRASO DOS CENTROIDES, PARA O CENÁRIO 1 (DIRETO) COM LOS.	74
FIGURA 5.4 GRÁFICO DO <i>CLUSTER</i> QUE CONTÉM O RAO DIRETO, REPRESENTA-SE A POTÊNCIA DAS MPCs VS. ATRASO NORMALIZADO DAS MPCs PARA O CENÁRIO 1 (DIRETO) COM LOS.	75
FIGURA 5.6 GRÁFICO DO Nº DE MPCs ASSOCIADAS A CADA <i>CLUSTER</i> EM FUNÇÃO DO MÁXIMO DO ATRASO DO CENTROIDE NORMALIZADO PARA O CENÁRIO 1 (DIRETO) COM LOS.	76
FIGURA 5.7 GRÁFICO DO Nº DE MPCs ASSOCIADAS A CADA <i>CLUSTER</i> EM FUNÇÃO DO ATRASO DO CENTROIDE PARA O CENÁRIO 1 (DIRETO) COM LOS.....	77
FIGURA 5.8 CENÁRIO NO QUE O FD-SAGE TEM PROBLEMAS DE ESTIMAÇÃO.....	78
FIGURA 5.9 RESPOSTA IMPULSIVA E ESTIMATIVAS DO FD-SAGE, COM PROBLEMAS DE RESOLUÇÃO CENÁRIO (DIRETO)	79

Lista de Símbolos

h_i	Canal para a antena receptora i
P_{dr}	Potência disponível na antena receptora
P_{dt}	Potência entregue à antena transmissora quando adaptada
P_{er}	Potência entregue pela antena receptora
P_r	Potência recebida
P_t	Potência transmitida
g_r	Ganho da antena receptora
g_t	Ganho da antena transmissora
l_{bf}	Perdas de propagação em espaço livre
l_t	Perdas de transmissão
n_i	Índice de refração do meio da onda incidente
n_{rf}	Índice de refração do meio da onda refractada
θ_i	Ângulo azimutal da onda incidente
θ_r	Ângulo azimutal da onda reflectida
θ_{rf}	Ângulo de refração
C	Capacidade
H	Matriz do canal rádio
d	Distância entre a antena transmissora e receptora
λ	Comprimento de onda
ρ	Relação do sinal- ruído

Lista de Acrónimos

AOA	Angle Of Arrival
CVI	<i>Cluster</i> Validity Index
DF	Decision Fusion
DSF	Delay ScalingFactor
FCM	Fuzzy C-Means
FD-SAGE	Frequency-Domain Space-Alternating Generalized Expectation Maximization
IR	Impulse Response
KPM	K- Power Means
LOS	Line Of Sight
MCD	Multipath Component Distance
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MPC	MultiPath Component
NLOS	Non Line Of Sight
SAGE	Space-Alternating Generalized Expectation Maximization
SF	Score Fusion
SIMO	Single-Input Single-Output
SNR	Signal to Noise Ratio
TOA	Time Of Arrival

1. Introdução

1.1 Contexto

Na última década o mercado das comunicações móveis experimentou um grande crescimento devido à necessidade de aumentar a cobertura e melhorar os serviços. O incremento do tráfego exigiu um aumento da capacidade nas redes. Um dos métodos desenvolvidos para tal propósito foi o uso dos dispositivos com múltiplex de antenas, o que normalmente é conhecido como *arrays* de antenas [1], que aproveitam as propriedades do multipercurso do canal.

As limitações de espectro e potência dificultam o processo de tentar melhorar o desempenho dos sistemas, sem implicar isto um aumento das necessidades de espectro e potência. O canal rádio pode ser difícil de estudar, devido aos distintos fenómenos que nele acontecem. A caracterização dos canais em banda larga, como o que acontece nos modernos sistemas de comunicações, além de prever as perdas de propagação é necessário modelar os efeitos da propagação multipercurso.

Os sistemas de comunicação tradicionais baseiam-se no uso de uma antena tanto no emissor como no recetor, o que chamamos SISO (*Single-Input Single-Output*) o qual nos permite explorar o domínio da frequência e o domínio do tempo. Uma técnica bem conhecida para combater o problema que supõe não conhecer as características do canal, é a chamada diversidade espacial. O uso destas antenas tanto no transmissor como no recetor, num meio que apresenta dispersão, constitui o que chamamos sistemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) ou SIMO (*Single-Input Multiple-Output*).

Para fazer um estudo do canal radio é imprescindível que estes modelos de canal reproduzam de maneira realista todo o comportamento dispersivo do canal de propagação o que é equivalente a conhecer o atraso, a direcção, etc.

1.2 Objetivo

O objectivo principal deste projecto é realizar um estudo sobre o comportamento do canal rádio num ambiente interior e interior-exterior e extrair parâmetros estatísticos para a criação de um modelo que caracterize o canal. Utilizando para a sua determinação um algoritmo de máxima resolução, como é o SAGE (*Space-Alternating Generalized Expectation Maximization*) no domínio da frequência, que nos permite estimar componentes como o atraso, o azimute, a elevação e a amplitude complexa.

Empregando técnicas de *clustering* e de validação de clusters, representamos os resultados no cenário, e conseguimos classificar o tipo de reflexões que se estão a produzir.

1.3 Trabalho prévio

O ponto de partida deste projecto começa, a partir da aplicação da técnica de *clustering*, pelo agrupamento dos raios. Os dados usados foram obtidos e formavam parte de um estudo anterior referido em [2] e a proposta do algoritmo SAGE no domínio da frequência como ferramenta para a estimação dos parâmetros do canal, já fora aplicada em [3].

O uso da ferramenta de *clustering* com a que se trabalhou, foi detalhada em [4]. Tudo o anteriormente referido foi utilizado para o desempenho deste projecto.

Esta dissertação situa-se no fim do percurso de todo este trabalho de investigação que já começou há alguns anos. Trata de completar e concretizar o trabalho já feito, adicionando coisas novas entre as quais extrair informação para a criação de um modelo de estimação do canal fazendo uso de todas as ferramentas desenvolvidas.

1.4 Resumo capítulo a capítulo

De seguida faz-se uma breve introdução sobre os conteúdos dos capítulos nos quais se resume esta dissertação.

O capítulo 2, pretende explicar os conceitos teóricos sobre o canal rádio, explicando os fenómenos de propagação que têm lugar no canal, assim como explicar os sistemas SIMO e MIMO que são utilizados na medição do canal. Introduzem-se alguns modelos de propagação de canal e explica-se em detalhe o modelo de Saleh-Valenzuela[5] que foi empregado para a elaboração de uma parte desta dissertação.

O capítulo 3, descreve o tratamento que os dados receberam. Apresenta-se o algoritmo SAGE e o FD-SAGE (*Frequency-Domain Space-Alternating Generalized Expectation Maximization*), como algoritmos de estimação de parâmetros do canal. Faz-se ainda uma introdução a alguns dos algoritmos de *clustering* que podemos encontrar na literatura [6] e também alguns índices que permitem validar o *clustering*. No fim do capítulo apresentam-se os resultados de um estudo completo do funcionamento destes índices de validação, a partir da geração de dados sintéticos.

O capítulo 4, mostra um estudo completo de dois cenários reais para os quais os resultados obtidos com o FD-SAGE depois da aplicação do algoritmo de *clustering* e escolhendo a solução que devolve os índices de validação, permitem classificar as componentes multipath que se estão a produzir nos cenários reais.

O capítulo 5, descreve o comportamento que apresentam os *clusters* (componentes multipath que são associadas entre elas), frente ao atraso ou o azimute, e que nos permitem obter resultados para a criação dum modelo que caracterize os *clusters*. Finalmente exploram-se algumas dificuldades que apresenta o algoritmo FD-SAGE no respeitante à resolução.

Finalmente no capítulo 6 apresentam-se os resultados obtidos e o cumprimento dos objectivos definidos, assim como algumas sugestões de trabalho futuro.

2. Caracterização do canal rádio

2.1 Introdução o canal rádio

A realização de um enlace, requiere a transferência de energia electromagnética ao médio de propagação no extremo do transmissor e a extracção de energia por parte do receptor. O canal rádio utilizado nos sistemas de comunicações sem fios apresenta muitas dificuldades para transmitir informação especialmente a taxa elevada. Existe muita diferença quando estamos ante uma transmissão em comunicações por cabo em que o canal é estacionário e previsível e um canal rádio que apresenta grandes variações com o tempo as quais são difíceis de antecipar.

A análise do canal pode chegar a ser complexa e existem muitos estudos que pretendem modelar o seu comportamento. O modelado do canal, pode chegar a ser uma das partes mais difíceis no desenho dos sistemas de comunicações rádio. Isto obriga ao desenvolvimento de modelos estatísticos que permitam a análise desta variabilidade e a sua influência num enlace radioelétrico.

2.1.1 Propagação em espaço livre

Num sistema de radiocomunicações sempre intervém de alguma forma o meio de propagação. Não obstante, normalmente estuda-se o caso ideal de propagação em espaço livre para a determinação das perdas mínimas esperadas no enlace.

Seguidamente vão-se adicionando às perdas diversas correcções e atenuações adicionais em função das características específicas do meio de propagação: presença de obstáculos, desvanecimentos, etc.

Se consideramos a antena transmissora e antena receptora como isotrópicas, no espaço livre, e se a distância d que as separa é o suficientemente grande para considerar que estamos em condições de campo distante, a potência captada pela antena receptora estará determinada, pela potência radiada, como é estabelecido na equação (2.1):

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 * P_t \quad (2.1)$$

Em função do valor obtido, definem-se as perdas básicas de propagação em condições de espaço livre, como o quociente entre a potência radiada pela antena transmissora e a captada pela receptora como aparece na equação (2.2):

$$l_{bf} = \frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.2)$$

A fórmula de Friis permite-nos então determinar as perdas de transmissão, entendendo-as como o quociente entre a potência entregue pela antena transmissora a uma carga adaptada e a potência entregue pela antena receptora à respectiva carga, supondo que estão separadas por uma distância d , como aparece na equação (2.3):

$$l_{tf} = \frac{l_{bf}}{g_t * g_r} \quad (2.3)$$

Se generalizamos para o caso em que temos antenas ideais como transmissora e receptora, cujas ganhos são g_t e g_r , a potência disponível no transmissor, calcula-se segundo à equação

$$P_{dt} = \frac{P_{et} * g_t * \lambda^2 * g_r}{16\pi^2 d^2} \quad (2.4)$$

Nas comunicações por rádio, como se explica na literatura [7] , utiliza-se a distribuição Rayleigh para descrever a variação estatística da envolvente do sinal que resulta depois

de uma propagação multipercurso na qual não há um raio persistente (ou seja todos os raios contribuem com a mesma amplitude e fase aleatória).

2.2 Mecanismos básicos

Existem quatro mecanismos básicos de propagação quando temos sistemas de comunicações móveis descritos na literatura [8] e [9]. Estes são: a reflexão, refração, a difracção e a dispersão (*scattering*):

- **Reflexão:**

O fenómeno de reflexão é comum: a luz reflecte-se e as ondas radioelétricas também experimentam o mesmo efeito. Quando a reflexão se produz, podemos observar que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão quando este incide sobre uma superfície condutora, este fenómeno é o mesmo que acontece com a luz.

A intensidade de campo eléctrico da onda reflectida e transmitida, depende do coeficiente de reflexão que é função das propriedades dos materiais y em general depende também da polarização da onda, do ângulo de incidência e da frequência da onda que se propaga.

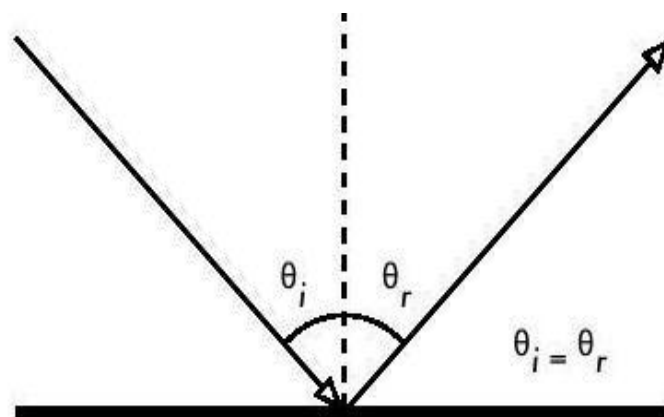


Figura 2.1 Exemplo de como uma onda se reflecte ao incidir numa superfície.

- **Refracção:**

Existe a possibilidade de que a onda rádio seja refractada. O fenómeno de refração ocorre quando uma onda transmitida a um meio distinto sofre variação da direcção de propagação.

O ângulo de incidência e o ângulo de refração medido com respeito a normal estão relacionados pela lei de Snell como aparece na equação (2.5).

$$n_i \cdot \sin \theta_i = n_{rf} \cdot \sin \theta_{rf} \quad (2.5)$$

Quando o ângulo de incidência é maior que o ângulo limite, o valor do seno do ângulo refractado tem um valor maior que a unidade, o qual indica, que as ondas que incidem como um ângulo maior que o ângulo limite, não são transmitidas ao meio, e portanto são totalmente reflectidas na superfície de separação.

- **Difracção:**

Os sinais rádio podem sofrer também difracção [10]. Quando os sinais encontram no seu caminho um obstáculo tendem a procurar caminhos o seu redor. Isto significa que um sinal pode ser recebido mesmo que um obstáculo se interponha no caminho entre o emissor e o receptor.

A difracção pode ser explicada através do princípio de Huygen's. Isto indica que cada ponto da frente da onda esférica poder ser considerado como uma fonte de uma frente de ondas secundárias. Apesar de que existirá uma zona de “sombra” por detrás do obstáculo, os sinais difractam-se ao redor do obstáculo.

- **Dispersão:**

A dispersão, ou também o termo denominado em inglês e o mais utilizado “*scattering*”, é um fenómeno físico no qual as ondas electromagnéticas, ao incidirem num objecto, vêm parte da sua energia dividida espalhada em todas as direcções.

Se o obstáculo com que chocam as ondas é lisa, homogénea e infinita, produzem-se alguns dos mecanismos expostos anteriormente, como são a reflexão e a difracção. Quando o tamanho do objecto é comparável como o comprimento de onda, a solução para estimar o que acontece não é simples.

Existem naturalmente modelos para prever a dispersão de objectos e igualmente superfícies rugosas onde a dispersão também ocorre.

O facto de existirem fenómenos como a refacção, reflexão, dispersão e difracção explica como existe recepção do sinal em lugares nos que não existe linha de visão entre emissor e receptor.

2.2.1 Caracterização dos canais multipercurso

Como é descrito na literatura [11], os canais multipercurso ainda que variantes no tempo, conservam a sua linearidade, pelo que podem caracterizar-se mediante funções de transferência e da resposta impulsiva, mas há que destacar os fenómenos de variação temporal e o desvio Doppler, o que supõem ter em consideração quatro variáveis que são o tempo (que denota a variabilidade tanto dos sinais transmitidos e recebidos como do canal), o atraso ou a dispersão temporal, e por último o deslizamento Doppler.

- **Variabilidade Temporal**

A variabilidade temporal é um efeito que o sinal sofre como consequência do deslocamento do móvel que faz variar as características ao seu redor. O sinal chega ao receptor em sucessivas versões com distintos atrasos e normalmente a amplitude diminui com o atraso.

A velocidade do móvel provoca um deslizamento em frequência, conhecido como desvio Doppler ou seja as frequências das componentes multipercurso poderão ser distintas da frequência radiada.

- **Desvanecimento rápido**

A principal das causas do desvanecimento rápido é a propagação multipercurso descrito em [12], os objectos do entorno produzem reflexões e *scattering* que dão lugar a que o sinal transmitido chegue em forma de múltiplas repetições com fases relativas e ângulo de chegada variável. A movimentação do móvel em distâncias tão curtas quanto o comprimento de onda provocam variações significativas de amplitude devido à possível soma (em fase) ou subtracção (em oposição de fase) das componentes multipercurso.

Para calcular a distribuição de probabilidade do sinal recebida existem duas distribuições padrão segundo estejamos num caso com LOS-Line Of Sight ou num caso de NLOS-Non Line Of Sight.

Quando estamos num caso em que temos LOS a função de probabilidade vem dada pela distribuição de Rice.

Se nos encontramos num caso no que não temos linha de visão, a função de probabilidade vem dada por uma distribuição de Rayleigh, como descrito na literatura [13].

- **Desvanecimento lento**

O desvanecimento lento ou também chamado “Slow Fading” em inglês, vem dado como consequência da variabilidade em larga escala (montanha, grande edifício, etc) do entorno em que o móvel se move. O desvanecimento lento descreve a variação mediana do sinal recebido.

Este tipo de desvanecimento pode ser caracterizado mediante uma distribuição gaussiana, como aparece mencionado na literatura[14].

- **Dispersão Temporal**

A dispersão temporal produz-se pela propagação multipercurso que sofre o sinal e depende da largura de banda que do sinal.

Se a Largura de Banda do Sinal < Largura de Banda de Coerência do Canal então o canal é plano em frequência: todas as frequências sofrem os mesmos efeitos. Se o sinal é estreito em frequência e amplo no tempo, o qual implica uma vantagem de transmitir em banda estreita, é que os ecos do sinal não interferem com o sinal principal transmitido.

Se a Largura de Banda do Sinal > Largura de Coerência do Canal, podemos dizer que o canal é selectivo em frequência. Neste caso o sinal é largo em frequência e estreito em tempo. Isto é uma vantagem, já que se o sinal é estreito no tempo podemos transmitir a maior velocidade que um sistema em banda larga, como a desvantagem de que embora, o eco do sinal pode interferir. O sistema pode ver a sua capacidade limitada por interferência entre símbolos.

2.3 Canal SIMO e MIMO

Os sistemas de comunicações com multiplexagem de antenas (os sistemas MIMO) geraram na última década um grande interesse na comunidade investigadora, como é citado em [15].

Um sistema SISO é um enlace onde o transmissor e o receptor dispõem de uma só antena. A capacidade destes sistemas em [16], vem dada por:

$$C = \log_2\{1 + \rho|h|^2\} \quad (2.6)$$

Onde h é o canal normalizado entre as duas antenas y ρ é a relação sinal-ruído (SNR, Signal-to- Noise Ratio) na antena receptora.

Num sistema SIMO com N_r antenas em recepção, a capacidade modifica e é dada por:

$$C = \log_2 \left\{ 1 + \rho \sum_{i=1}^{N_r} |h_i|^2 \right\} \quad (2.7)$$

Onde h_i é ganho do canal para a antena receptora i . Observando a equação (2.7), conclui-se que à medida que aumentamos o número de antenas receptoras, só se produz um incremento logarítmico da capacidade média.

A tecnologia MIMO foi desenvolvida durante muitos anos e tornou necessário formular novos conceitos e adequar as tecnologias para permitir a implementação. Novas técnicas de processamento foram introduzidas para permitir novas características de multiplexagem espacial, assim como utilizar MIMO para melhorar a diversidade espacial.

O trabalho inicial feito como sistemas MIMO, centrou-se na diversidade espacial básica: o sistema MIMO utilizou-se para limitar a degradação causada pela propagação multipercurso. Não entanto, isto foi o primeiro passo para utilizar a propagação multipercurso como vantagem e não como contrariedade.

O canal pode ver-se afectado de modo que a relação do sinal ruído pode piorar. O princípio da diversidade espacial é proporcionar o receptor multiplex versões do mesmo sinal mas capturadas a alguma distância de acordo com o fenómeno fast-fading: em consequência a diversidade ajuda a estabilizar a relação sinal ruído.

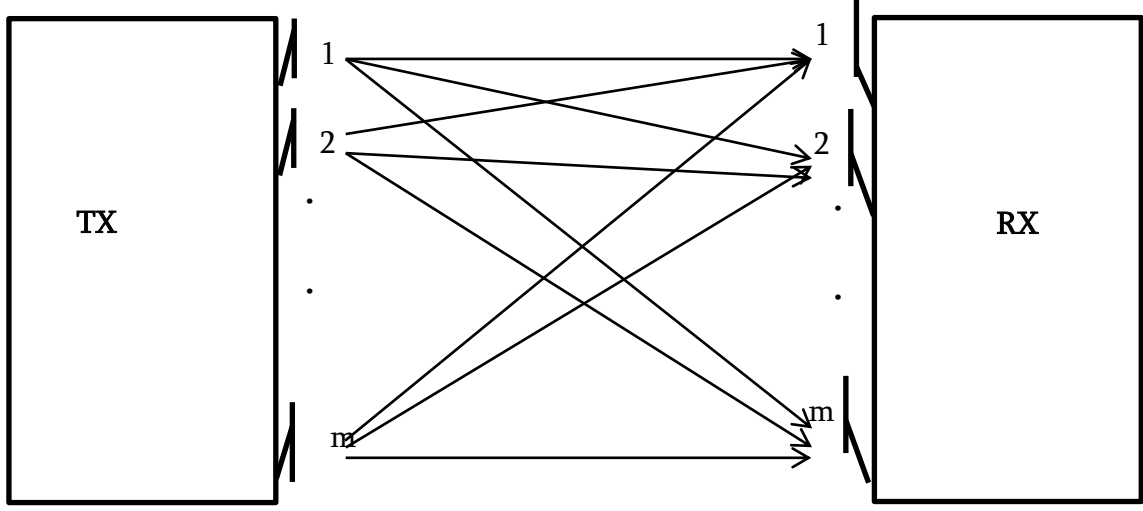


Figura 2.2 Exemplo de uma comunicação entre transmissor e receptor usando um sistema MIMO.

Consideraremos um sistema MIMO equipado com N_T antenas transmissoras e N_R antenas receptoras e $h_{i,j}(t, \tau)$ a resposta impulsiva do canal variante temporal entre a j -ésima antena transmissora e a i -ésima antena receptora. Desta forma o canal MIMO representado na Figura 2.1, é caracterizado pela matriz $H(t, \tau)$, de dimensões $N_R \times N_T$, dada por [17]:

$$H(t, \tau) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(t, \tau) & \cdots & h_{1,N_T}(t, \tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1}(t, \tau) & \cdots & h_{N_R,N_T}(t, \tau) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

O sinal que se transmite pode ser descrito como um vector dado por (2.9), onde $s_j(t)$ representa o sinal que é transmitido pela antena j -ésima.

$$s(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_{N_T}(t)]^T \quad (2.9)$$

Por último o vector que representa o sinal que é recebido $y(t)$ nas N_R antenas pode ser exprimido, como a convolução temporal entre o sinal que se transmite com a resposta temporal do canal mais o ruído adicional ($n(t)$):

$$y(t) = \int_t H(t, \tau) \cdot s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (2.10)$$

- **Capacidade dos Sistemas MIMO em Canais Deterministas Não Dispersivos:**

Baseando-nos na equação e de acordo com o teorema de Shannon referenciado em [18], a capacidade de um canal MIMO ideal vem dada por:

$$C_{MIMO} = \log_2(\det(I_{N_R} + \frac{1}{N_T} \rho H Q H^H)) \quad (2.11)$$

Onde H^H representa a matriz trans-conjugada da matriz de transmissão do canal H , Q é a matriz de covariância do vector s .

- **Canais Selectivos em Frequência (Dispersivos):**

A capacidade de um canal MIMO selectivo em frequência pode ser calculada dividindo a banda de interesse em M sub-bandas de forma que o canal em cada sub-banda possa ser considerado como uniforme. Desta forma o canal pode ser visto como um conjunto de M sub-canais. A capacidade então pode ser dada por:

$$C_{SF} \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(\det(I_{N_R} + \frac{1}{N_T} H_i Q H_i^H)) \quad (2.12)$$

2.3.1 Potencialidades dos Sistemas MIMO

Os benefícios que os sistemas MIMO apresentam advêm da exploração do domínio espacial já foram comentados e utilizam técnicas de formatação de feixe, diversidade

espacial e multiplexagem espacial. Para isto os terminais devem estar equipados com várias antenas. As técnicas de formatação de feixe têm como objectivo concentrar a energia de um sinal segundo uma direcção bem definida. O seu desempenho será tanto melhor quanto mais directivo for o canal de propagação.

Já a diversidade espacial, como já foi comentado em secções anteriores, leva a que as comunicações rádio sejam fortemente afectadas pelo desvanecimento do sinal, causado essencialmente pela propagação multipercurso. Uma das técnicas utilizadas para combater este efeito é a diversidade espacial.

Em sistemas MIMO é possível explorar a diversidade espacial tanto no emissor como no receptor de forma a melhorar o desempenho global do sistema.

2.3.2 Modelo para caracterizar o canal direccionado

Nas comunicações rádio é habitual que existam desvanecimentos provocados pelas interferências que produzem o multipercurso. Existem modelos que tratam de caracterizar o canal direccionado nestas condições, determinando a diversidade angular e temporal-espacial.

Os modelos estatísticos são caracterizados por grupos de parâmetros, que são utilizados para gerar a resposta ao impulso do canal real. Os modelos estatísticos são preferíveis para a realização de simulações de sistemas completos de comunicações, já que requerem menor complexidade computacional.

Modelo de Saleh-Valenzuela

Como foi dito, a resposta do canal, pode ser utilizada para modelar o que acontece quando estamos a trabalhar em ambientes interiores (“indoor”- termo em inglês). Saleh e Valenzuela [5] utilizaram os resultados obtidos a partir de medições reais, para criar

um modelo estatístico que caracterize a propagação em sistemas de comunicações interiores.

O modelo supõe que as múltiplas réplicas do sinal, que chegam em grupos compactos ao receptor, comumente conhecidos como *clusters*.

A formação destes clusters, está relacionada com a estrutura dos obstáculos enquanto as componentes multipercurso dentro de cada *cluster* são geridas como resultado de múltiplas reflexões em objectos próximos. O modelo unicamente distingue entre trajectórias de tempo retardado e modela os tempos de chegada utilizando o processo de Poisson, e as chegadas dentro de cada *cluster* com outro tipo de processo de Poisson, mas com uma taxa de chegada mais alta.

Saleh e Valenzuela assignaram amplitudes aleatórias como distribuição Rayleigh independentes às diferentes trajectórias, de forma que a potência média Rayleigh, obedece ao produto de duas exponenciais decrescentes, onde uma representa a amplitude dos *clusters*, e a outra diz respeito às amplitudes dos raios dentro de cada cluster.

Os correspondentes ângulos de fase para cada trajectória são variáveis independentes uniformemente distribuídas entre $[0, 2\pi]$.

Baseando-se no modelo de Saleh-Valenzuela e nas suas próprias medições, Spencer e outros, como aparece na literatura [19], estenderam o modelo para incluir o ângulo de chegada, o qual está uniformemente distribuído nos 360 graus de cobertura.

Atribuem-se os ângulos de chegada dos raios em cada *cluster* mediante variações do ângulo médio de chegada, geridas com uma distribuição Laplaciana independente e identicamente distribuída.

Neste modelo supõe-se que em tempo e em ângulo de chegada as componentes são estatisticamente independentes.

3. Tratamento e análise da informação

Ao longo deste capítulo descrevem-se ferramentas necessárias para poder fazer um correto tratamento dos dados, como métodos de agrupamento de dados – *clustering* e medidas de validação para resultados destes métodos de *clustering*. O seu desempenho é avaliado a partir de simulações estatísticas.

Devido à necessidade de calcular os parâmetros espaciais-temporais da resposta impulsiva do canal, a partir da resposta em frequência optou-se pelo uso de algoritmos de elevada resolução, os quais pretendem estimar o número e as características das componentes multipercurso que podem chegar a um dado recetor.

Neste trabalho foi usado o algoritmo SAGE na sua versão da frequência (FD-SAGE) o qual nos permitiu estimar parâmetros como o AOA (*Angle Of Arrival*) e o TOA (*Time Of Arrival*). Na secção seguinte encontramos uma explicação breve sobre o funcionamento do FD-SAGE.

Em seguida, utilizamos um algoritmo de *clustering* que nos permite agrupar os resultados obtidos com o FD-SAGE em conjuntos, de maneira a que as componentes pertencentes a um dado conjunto apresentem características similares. Assim os resultados ficam organizados adequadamente para serem manipulados.

De acordo com a bibliografia disponível[20], a dificuldade do *clustering* recai na seleção do número de *clusters* apresentado pelos dados a tratar. Para poder validar o número de *clusters* que melhor representa as características de um conjunto de dados específico, usamos índices de validação.

3.1 Algoritmo SAGE e FD-SAGE

Existe uma série de algoritmos de elevada resolução que permitem estimar os parâmetros do canal, para poder assim caracterizar as características espaciais-temporais.

O algoritmo SAGE [21], ou qualquer método baseado no algoritmo EM, é capaz de resolver o problema da estimação dos parâmetros característicos do canal, através dum método iterativo, onde em cada iteração o algoritmo é capaz de calcular uma estimativa da função de verosimilhança das observações, e por maximização desta é possível obter uma estimativa dos parâmetros desejados.

O algoritmo SAGE é capaz de separar os parâmetros em vários subconjuntos, que podem estar sobrepostos de forma que em cada iteração, alguns dos subconjuntos permaneçam fixos enquanto outros são atualizados. Além disso introduz-se um espaço oculto de dados respeitantes aos parâmetros.

O algoritmo pode ser decomposto nos passos seguintes:

1. Inicialização dos parâmetros.
2. (Uma iteração começa) Descomposição do sinal.
3. Escolha dum espaço completo de dados para os parâmetros.
4. Aplicação das equações: passos E (Expectation) e M (Maximization).
5. (Uma iteração termina) Avaliação da convergência: se não se consegue ou nem finalizam as iterações, voltamos o passo 2.

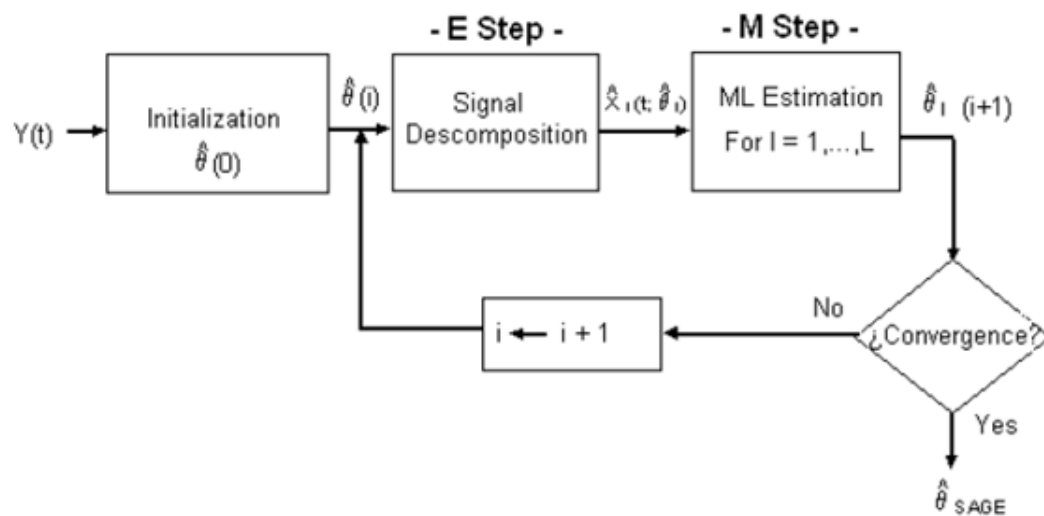


Figura 3.1 Diagrama de fluxo do algoritmo SAGE.

Para a elaboração deste projeto utilizou-se o SAGE no domínio da frequência ou também denominado FD-SAGE[22] de forma que se obtém resultados satisfatórios tanto em canais sintéticos como em canais reais, já que os dados experimentais são adquiridos no domínio da frequência[3].

No gráfico seguinte, podemos observar como o algoritmo FD-SAGE, é capaz de estimar componentes do canal. Em cor cinzento estão a ser representadas a resposta impulsiva (IR) do canal, e noutras cores aparecem representadas as componentes que o FD-SAGE estima.

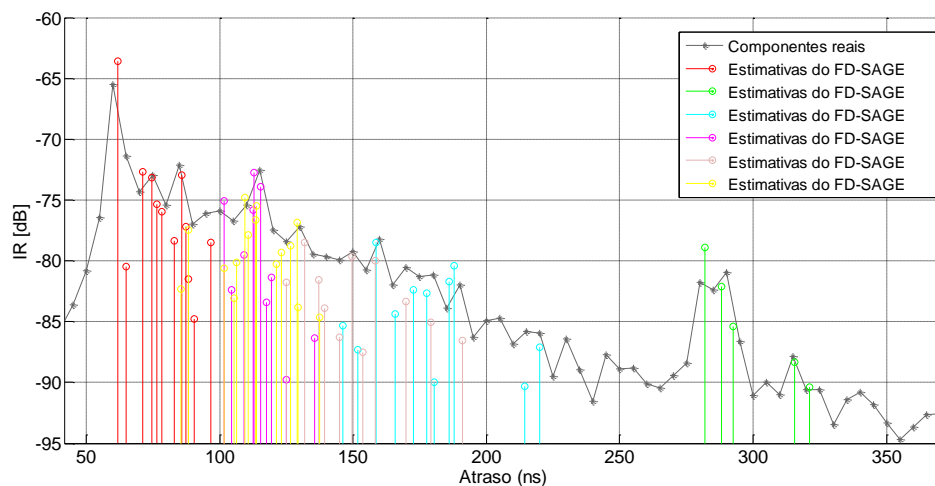


Figura 3.2 Gráfico das estimativas do FD-SAGE para um exemplo real.

3.2 Algoritmos de *clustering*

Na literatura [23], podemos encontrar vários algoritmos de agrupamento (*clustering*) que nos permitem organizar um conjunto de dados, em subconjuntos mais pequenos, de maneira a que as componentes pertencentes a cada subconjunto apresentem características semelhantes. A aplicação destes algoritmos têm como objetivo devolver uma série de pontos que em certo modo representam o resto dos pontos iniciais pela sua posição privilegiada com respeito ao total. Na maioria dos algoritmos que encontramos na literatura a dificuldade recai em determinar o número inicial ou total de grupos (*clusters*) em que deveremos dividir o conjunto dos dados.

Os algoritmos de agrupamento mais utilizados são:

- K-means *clustering*.
- Fuzzy c-means *clustering*.

K-Means Clustering: Trata-se de um algoritmo[24] de aprendizagem não supervisionado. O procedimento é simples e permite classificar um conjunto de dados, fixando *a priori* o número de *clusters* (assumindo *K clusters*). A ideia principal é definir

K -centroides, um por cada *cluster*, em que a forma de distribuí-los consiste em separar ao máximo os centroides uns dos outros. O passo seguinte é associar cada MPC (MultiPath Component) ao centroide mais próximo. Seguidamente, nós necessitamos recalcular novos centroides como baricentros tendo em conta as componentes associadas e repetindo o processo anterior, chega-se a um momento em que a solução estabiliza.

Fuzzy C-Means clustering (FCM): Trata-se de um algoritmo [25] não supervisionado. FCM tenta encontrar o ponto mais característico em cada *cluster*, o qual será considerado como o “centroide” do *cluster*. O número de *clusters* a formar deve ser conhecido *a priori*. A principal diferença entre os algoritmos *K-Means* e *Fuzzy C-Means* é que enquanto no primeiro cada MPC é associada unicamente a um *cluster* (de forma rígida), no segundo cada MPC pode pertencer a mais do que um *cluster*, tendo associado, em relação a cada *cluster*, um coeficiente que traduz um grau de pertença a esse mesmo cluster.

Neste trabalho usamos uma variação do *K-Means Clustering*, que tem em conta a potência das MPCs para a formação dum *cluster* e no cálculo da posição do centroide dentro do *cluster*.

K-Power Means (KPM): Admitindo uma estrutura de dados $L \times N$, onde L representa o número de MPCs e N é o número de parâmetros de cada MPC: atraso, azimute e potência.

Tendo em conta que desejamos dividir o conjunto de dados em K -clusters. O algoritmo KPM funciona da seguinte forma:

- 1- Inicialização: Calcular a posição inicial dos centroides dos *clusters*.
- 2- Para $i=1$ até Máximo de Iterações
 - a) Criar uma partição de dados, onde cada MPC é associada ao *cluster* mais próximo.

- b) Atualizar a posição do centroide de cada *cluster* tendo em conta a potência das componentes associadas a esse centroide.
 - c) Se já não se movem os centroides dos *clusters*, ir para o passo 3.
- 3- Devolução dos valores dos centroides para cada *cluster*.

O algoritmo KPM pode convergir para soluções diferentes dependendo do critério usado no cálculo da distância entre MPCs e uma MPC a um centroide. O cálculo dessa distância é um pouco difícil de estabelecer quando estamos a trabalhar com conjuntos de dados multidimensionais em que os dados das diferentes dimensões se apresentam em unidades diferentes (como atraso, ângulos, etc.). Esta dificuldade foi resolvida em [26], onde se introduz o conceito de MCD, a qual é normalizada e ponderada para cada dimensão do conjunto de dados.

MCD é calculada como a norma euclidiana de um vetor, utilizando como coordenadas as distâncias normalizadas em cada domínio (atraso e ângulo). Existe ainda um fator de ponderação DSF (Delay Scaling Factor) que se utiliza para dar mais ou menos peso ao domínio do tempo em relação aos restantes.

A inicialização do algoritmo consiste em:

- 1- Escolher como primeiro centroide a MPC que apresenta maior potência.
- 2- Repetir:
 - a. Obter para cada MPC a distância (MCD) ao centroide mais próximo.
 - b. Escolher para o próximo centroide a MPC que apresentar distância máxima

Até alcançar o número K de centroides.

Com este procedimento consegue-se distribuir os centroides sobre os dados e depois da primeira atribuição das MPCs, os centroides movem-se de forma rápida para os lugares onde se encontram as MPCs, que têm maior potência.

3.3 Medidas de validação para o *clustering* e Técnicas de Fusão

Como referido na secção anterior, a determinação do número de *clusters* em função dos dados com que estamos a trabalhar, não é uma tarefa muito simples. Na literatura estão disponíveis algumas medidas de validação para *clustering* (CVI – *Cluster Validity Index*), propostas com o objetivo de determinar o número de *clusters* que melhor se adequa a um conjunto de dados.

A análise é normalmente realizada comparando diferentes soluções obtidas para diferentes números de *clusters* e selecionando a melhor solução, i. e., a solução que apresenta *clusters* mais compactos e mais separados uns dos outros. Ainda assim, porque estas medidas de validação frequentemente apresentam resultados diferentes, por vezes poderá ser necessário testar de forma visual, que a solução escolhida é a mais aceitável. A seguir são apresentados alguns índices para validar o número de *clusters* [27].

Nos parágrafos seguintes faz-se uma descrição de cada um deles, considerando a seguinte notação: K representa o número de *clusters*; k é o índice de um dado *cluster*; L é o número total de MPCs; L_k é o número de MPCs pertencentes ao *cluster* k ; s_l é a l -ésima MPC e c_k é o centroide do *cluster* k .

Medidas de Validação para *Clustering* (CVIs)

Na literatura encontramos vários índices que servem para facilitar a escolha do número de *clusters* que é mais aceitável conforme a distribuição dos dados. Alguns dos índices com que iremos trabalhar são de maximização embora haja outros que realizam a

minimização. Optamos por descrever quatro índices distintos, ainda que no total empreguemos dez (XB[28], CH[4], PCAES[28], D53[4], SC[28], PBM[4], FS[28], D33[29], D[29], XBK[4]).

- ***Calinski-Harabasz (CH) index***: Aparece descrito em profundidade em [30],

$$v_{CH} = \left[\frac{\sum_{k=1}^K L_k (MCD(c_k, c))^2}{K-1} \right] / \left[\frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} (MCD(s_l, c_k))^2}{L-K} \right] \quad (3.1)$$

- ***Xie-Beni (XB) index***: Aparece descrito em profundidade em [24] e em [30],

$$v_{XB} = \left[\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} (MCD(s_l, c_k))^2 \right] / (L \times [\min_{k1,k2} ((MCD(c_{k1}, c_{k2}))^2)]) \quad (3.2)$$

- ***PBM index***: Aparece descrito em profundidade em [24],

$$v_{PBM} = \left(\frac{1}{K} \times \frac{\max_{k1,k2} ((MCD(c_{k1}, c_{k2})))}{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} (MCD(s_l, c_k))} \right)^2 \quad (3.3)$$

- ***Generalized Dunn's (D53) index***: Aparece descrito em [31],

$$v_{Dij} = \min_{k1,k2} \delta_i(k1, k2) / \max_k \Delta_j(k) \quad (3.4)$$

Técnicas de Fusão

Cada um dos CVIs anteriores propõe um resultado K_{opt} , tendo em conta diferentes particularidades dos dados e, desta forma, podemos alcançar distintos resultados dependendo do CVI escolhido. Na literatura existem muitos estudos que comparam [25] o bom funcionamento dos CVIs, mas não existe nenhum CVI que se destaque sobre as

restantes. No entanto é possível melhorar um pouco o desempenho das CVIs, quando estes são combinados entre si: trata-se de alcançar uma solução de compromisso para melhorar a robustez da solução.

Para obter melhores resultados no nosso trabalho, baseando-nos no estudo apresentado em [20], decidimos combinar as distintas soluções considerando três estratégias de fusão dos CVIs. Desta forma temos: *Score Fusion-Based Methods (SF)*, *Decision Fusion-Based Methods (DF)* e *Decision Rank Fusion-Based Methods (Kr)*.

Score Fusion Methods (SF): Este método consiste na combinação de forma aritmética dos resultados de várias CVIs. Por forma a obter resultados consistentes é necessário normalizar os CVIs a um mesmo intervalo de valores: optou-se pela normalização *min-max* que coloca todos os valores no intervalo $[0,1]$, de acordo com uma regra linear. Caso tenhamos um CVI de minimização ainda se transforma de acordo com: $1 - v_{XB}$, de forma a que a melhor solução corresponda ao máximo do CVI. Considerando que M denota o número de CVIs, as alternativas de combinação estudadas foram:

$$\text{SF_A: } SFa(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M v_i(k) \quad (3.5)$$

$$\text{SF_G: } SFg(k) = (\prod_{i=1}^M v_i(k))^{1/M} \quad (3.6)$$

$$\text{SF_H: } SFh(k) = \frac{i}{\sum_{i=1}^M \frac{1}{v_i(k)}} \quad (3.7)$$

$$\text{SF_med: } SFmed(k) = median(\{v_1(k), v_2(k), \dots, v_M(k)\}) \quad (3.8)$$

Decision Fusion-Based Methods (DF): Na literatura [20] sugere-se a utilização de um esquema de voto para os CVIs, $d_m = arg_i \max(v_i(k))$: trata-se de encontrar a solução que tem maior probabilidade de acontecer.

$$\text{DF_A: } d_{FA} = round(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M d_m) \quad (3.9)$$

$$\text{DF_G: } d_{FG} = round((\prod_{i=1}^M d_m)^{1/M}) \quad (3.10)$$

$$\text{DF_Mod: } d_{FMod} = mode(\{d_1, d_2, \dots, d_M\}) \quad (3.11)$$

$$\text{DF_Med: } d_{FMed} = median(\{d_1, d_2, \dots, d_M\}) \quad (3.12)$$

Decision Rank Fusion-Based Methods (Kr): A partir dos resultados obtidos com os CVIs, introduzimos ainda o esquema de *rank-based scheme*. Cada CVI cria um *ranking* para as soluções permitidas.

A pior solução recebe um ponto, enquanto cada uma das seguintes recebe mais um ponto que a anterior, mas a melhor das soluções recebe mais dois pontos que a anterior. Finalmente, para cada solução, somam-se os pontos atribuídos por cada CVI. A solução que obtiver a pontuação mais alta é o chamado K_{opt} .

De seguida são apresentados alguns resultados das técnicas de fusão, tomando como exemplo a caracterização de um canal real. Na Figura 3.3 temos uma representação em bolinhas do AOA e o TOA dos raios que atravessam um canal real.

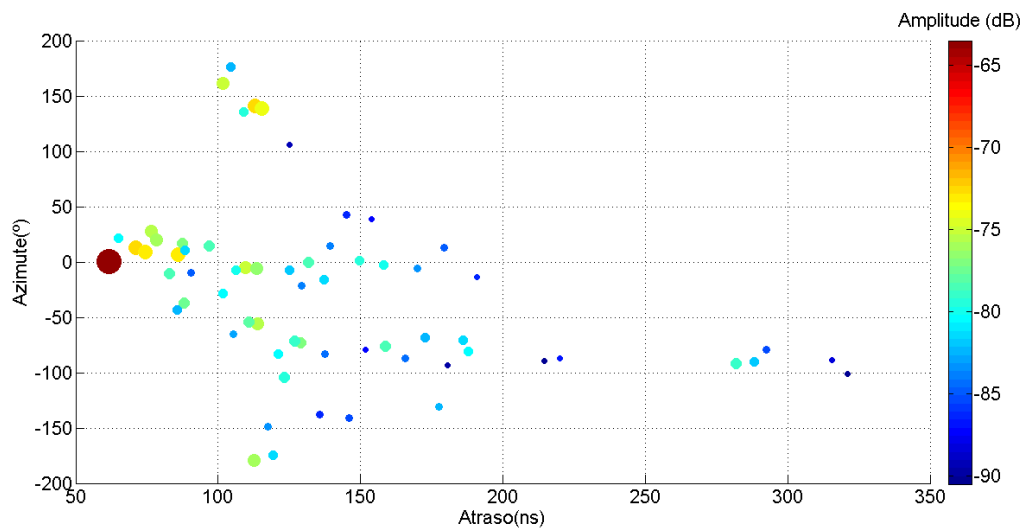


Figura 3.3 Exemplo dum canal real.

Na Figura 3.4, os raios são representados formando *clusters*, neste caso em concreto baseando-nos nas soluções escolhidas pelos índices XB e D53, representamos os resultados para $K=4$ e $K=6$ respetivamente.

Por inspeção visual, faz mais sentido dividir o conjunto de dados reais em $K=6$ *clusters*, já que a solução com $K=4$ apresenta alguns macro-*clusters* que poderão contemplar MPCs com origem física bastante distinta. Além disso, também podemos observar na Figura 3.6, a existência de outras soluções que em termos de qualidade são semelhantes à escolhida e também se poderiam ajustar ao comportamento dos dados.

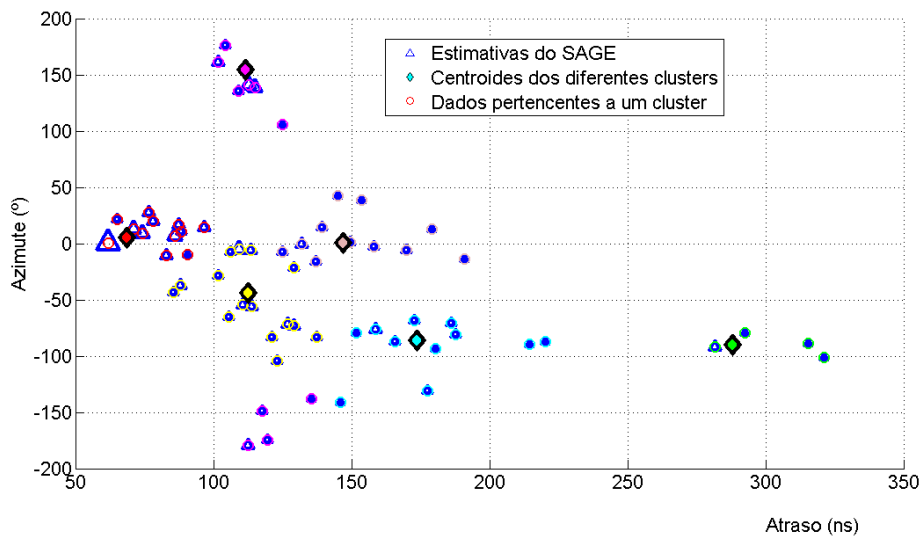


Figura 3.4 Solução índice D53 com $K=6$ *clusters*, para a Figura 3.3.

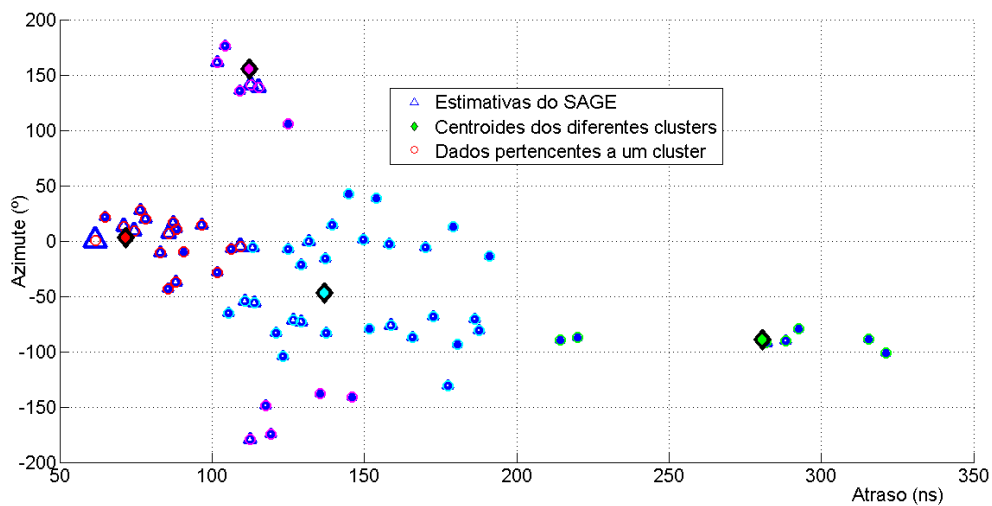


Figura 3.5 Solução índice XB com $K=4$ *clusters*, para a Figura 3.3.

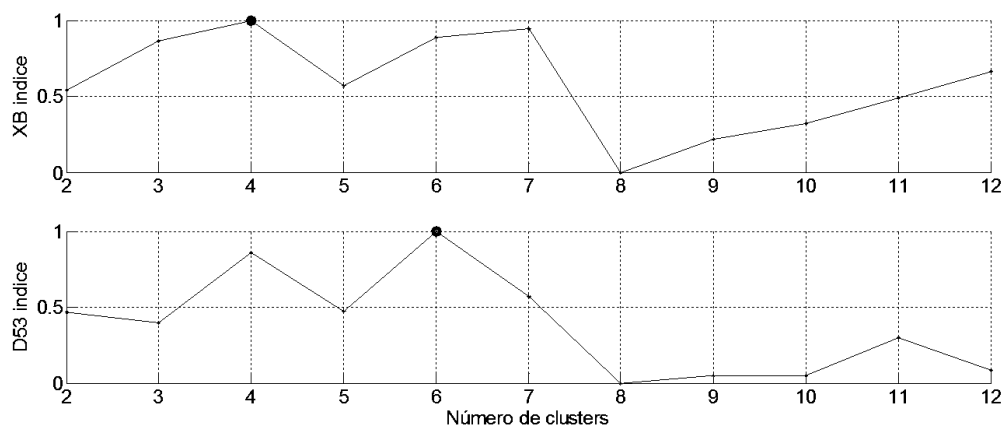


Figura 3.6 Solução escolhida pelos índices XB e D53 para a Figura 3.3.

Na figura seguinte representamos algumas das soluções escolhidas empregando as técnicas de fusão. Como vemos para as Score Fusion-Based Methods a melhor solução é $K=6$ enquanto para as Decision Rank Fusion-Based Method a melhor solução é $K=4$. Como vemos neste exemplo as técnicas de fusão não são muito concordantes, mas servem-nos para escolher dentro de todas as soluções, aquelas que são mais prováveis. Para concluir a análise podemos determinar que as melhores soluções serão as seguintes: 4, 6 e 7 *clusters*. Haveria que procurar visualmente entre todas, aquela que se adapta melhor e é mais representativa da distribuição que têm os dados.

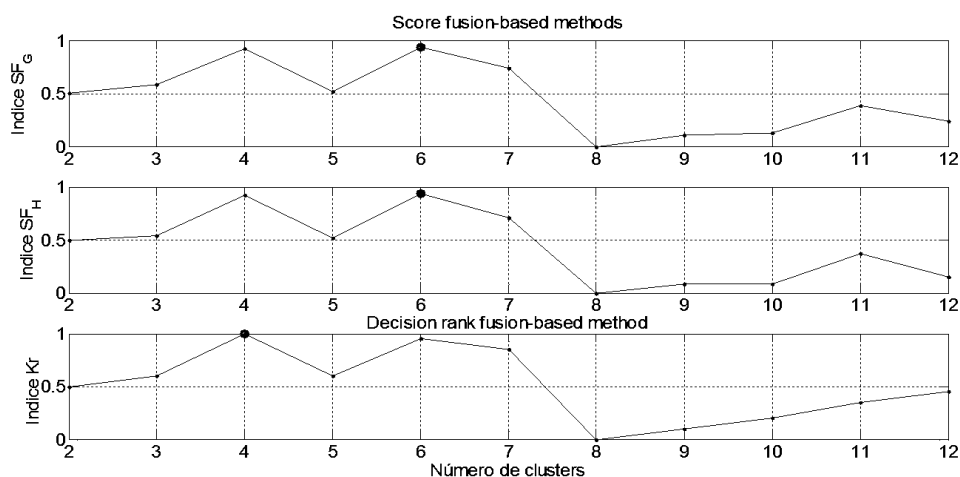


Figura 3.7 Soluções obtidas mediante as técnicas de fusão.

3.4 Resultados das medidas de validação em dados sintéticos.

Como foi explicado na secção 3.3, para poder avaliar o funcionamento das medidas de validação para o nosso sistema SIMO e obter estatísticas como histogramas de cada uma das CVIs, foi necessário gerar dados sintéticos para poder extrair conclusões. Os dados sintéticos permitem criar situações controláveis que são úteis neste tipo de avaliação.

Baseando-nos numa extensão do modelo de Saleh-Valenzuela [19], aplicado a sistemas SISO, conseguimos modelar o canal, organizando as MPCs em *clusters* que agrupam aqueles raios que apresentam características semelhantes. Nas secções seguintes é apresentada uma explicação mais detalhada.

3.4.1 Geração de dados sintéticos a partir da extensão do Modelo Saleh-Valenzuela

O modelo de Saleh-Valenzuela, tal como se explicou no capítulo anterior, utiliza-se para caracterizar os raios multipercurso em ambientes interiores[5]. A partir deste modelo, podemos supor, que recebemos como sinal de chegada um conjunto de raios agrupados em *clusters*. Considera ainda que os AOA e os TOA são estatisticamente independentes. Os tempos de chegada dos *clusters* são caracterizados através de uma distribuição de Poisson e os ângulos de chegada dos raios seguem o modelo de uma distribuição de Laplace, como é representado na Figura 3.8.

Para a geração dos dados sintéticos, seguimos o modelo anterior usando uma extensão do modelo proposta em [19] para sistemas SISO. Além disso, aplicamos a MCD para o cálculo de distâncias entre conjuntos de dados, para testar e rejeitar uma dada realização do canal caso esta apresente sobreposição de *clusters*.

Desta forma, o novo modelo cria um *cluster* e testa se este é compatível em distância com os já criados, se isto não se verifica, rejeita-se e cria-se um novo *cluster*. Geraram-se mil conjuntos de dados para cada valor da variável K; variável que representa o número de *clusters* do conjunto de dados e assume valores entre dois e onze.

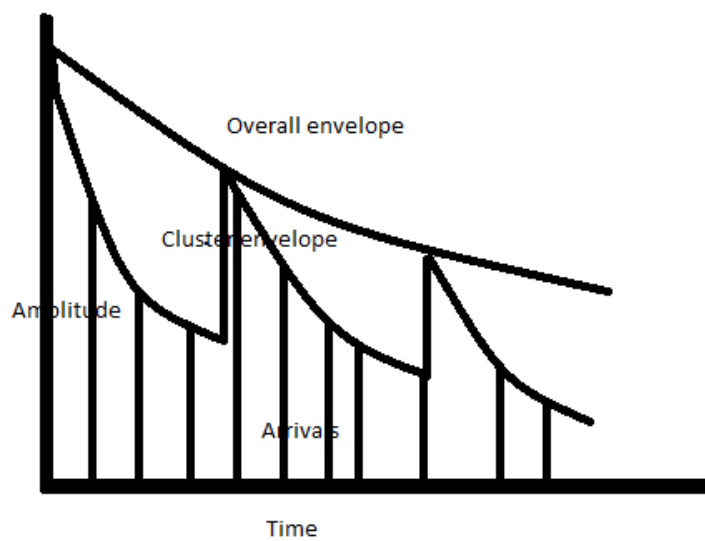


Figura 3.8 Ilustração do decaimento exponencial da amplitude dos *clusters* e do decaimento dos raios dentro dos *clusters*.

3.4.2 Resultados do KPM a partir de dados sintéticos

Para poder analisar o comportamento dos CVIs geramos dados que se encontram distribuídos em *clusters* (variando o número de *clusters* desde dois como mínimo até onze *clusters* como máximo).

NOTA: Para o seguinte a variável K representa o número de *clusters* em quem se particionam os dados sintéticos.

O processo de análise é o seguinte:

1. Selecionar o número de *clusters* que queremos gerar ($K=2..11$ *clusters*).
2. Gerar os dados sintéticos.
3. Executar o algoritmo KPM.

O algoritmo KPM devolve as partições com $K=2..11$. Seguidamente são aplicados os índices de validação e as técnicas de fusão para comparar estas soluções e seleccionar uma delas.

Para poder extrair estatísticas, os mil conjuntos de dados gerados para cada número de *clusters* foram introduzidos no algoritmo KPM.

3.4.3 Estadísticas sobre o funcionamento das medidas de validação

Os índices de validação atuam da seguinte forma: uma vez que já executamos o algoritmo KPM, os índices das medidas de validação (CVIs) escolhem o número de *clusters* que se ajustam melhor para o conjunto de dados. Com bases nestes resultados dos CVIs, cada uma das Técnicas de Fusão elege uma solução. Inicialmente, as técnicas de fusão basearam-se na informação dos índices XB, D53, PBM e CH.

De seguida é apresentado um exemplo que representa as características do funcionamento dos índices das medidas de validação dos *clusters* (XB, D33), para vários números de *clusters*. Como vemos no gráfico estamos a representar a percentagem de acerto para o índice XB, quando temos K *clusters*.

Analisando a Figura 3.9, na qual mostramos dois casos extremos, podemos extrair como conclusão, que o índice XB, apresenta um funcionamento bastante aceitável e muito regular, independentemente do número de *clusters* com que estejamos a trabalhar. Já o índice D33 (Figura 3.10) unicamente funciona bem para poucos *clusters* e não apresenta um comportamento estável quando se varia o número de *clusters*.

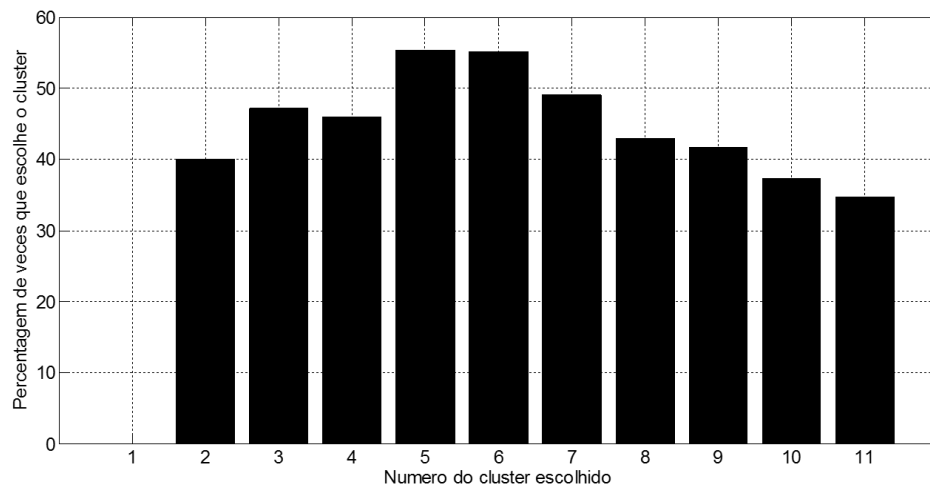


Figura 3.9. Percentagem do índice XB.

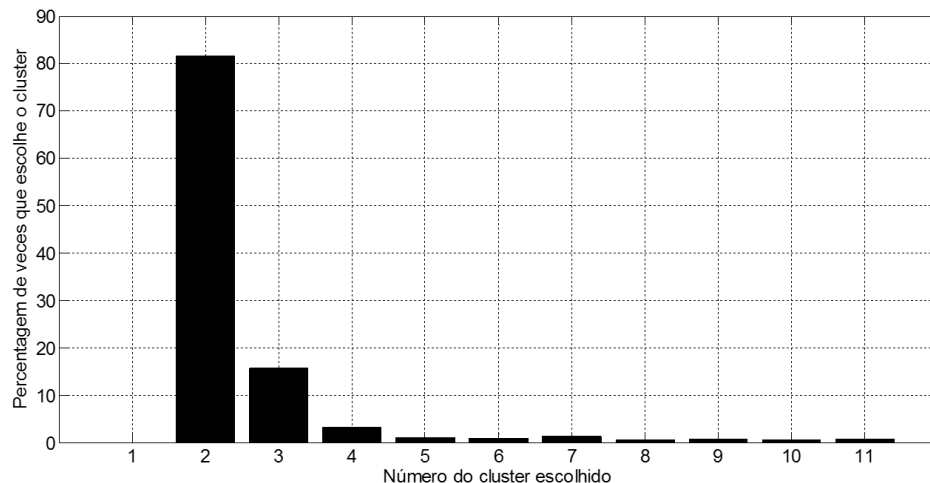


Figura 3.10 Percentagem do índice D33

O comportamento mais desejável num índice de validação é que seja estável e capaz de escolher bem, independentemente do número de *clusters* com que estejamos a trabalhar.

Fazendo uma análise completa das medidas de validação, e repetindo o processo exposto anteriormente, podemos extrair os resultados da percentagem de acerto para todos os CVIs, apresentados na tabela seguinte:

K-Cluster	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D	2,4	19,9	33,7	37	36,8	33,9	29,7	29,8	27,6	29,5
CH	2	1,7	4,5	8	14,4	23,2	34	41,4	53,9	78,9
FS	0,8	1,7	1,9	3,1	3,6	3,5	5,6	7,4	18,7	90,2
SC	95,6	2,3	0	0	0	0	0	0	0	0
XB	40	47,2	46	55,4	55,1	49	43	41,7	37,3	34,7
D33	81,7	15,7	3,3	1,2	0,9	1,3	0,6	0,8	0,6	0,8
D53	65,9	47,8	39,3	48,6	48,4	46,9	43,7	42,7	39,3	35,4
PBM	0	0	0	0,1	0,6	2,3	7,1	16,8	34,5	83,8
XBK	89,7	41,8	30,2	38,1	37	29,5	22,7	20	16,6	13,1
PCAES	0	0	0,1	0	1	2,4	4,5	8,3	12,6	21

Tabela 3-1 Percentagens dos índices de validação

Como se pode observar na Tabela 3-1, existem índices muito instáveis, que apresentam resultados bons nos valores extremos do número de *clusters* (FS ou D33), enquanto outros como o XB ou o D53 estão sempre próximos duma percentagem do 50% para qualquer *K-cluster*.

Para os índices obtidos a partir das técnicas de fusão, finalmente depois duma análise exhaustiva, decidimos usar unicamente as CVIs que apresentam melhores resultados (XB, D53). Na tabela seguinte temos os resultados das percentagens correspondentes aos índices das técnicas de fusão.

K-Cluster	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DF_A	39,2	51	41,5	49,7	49,2	45,9	42,3	40,4	37,7	31,6
DF_G	42,2	45,1	38,8	47,2	46,4	42	36,5	37	33,3	26
DF_Med	39,2	51	41,5	49,7	49,2	45,9	42,3	40,4	37,7	31,6
DF_Mod	66,7	45,8	38,4	46,7	45,6	41,6	35,7	36	32,2	26
SF_A	62,8	48,5	41,4	52,2	51,7	49,1	45,2	43,7	40	36
SF_G	64	48,5	41,4	52,2	51,7	49,1	45,4	43,7	40	36
SF_H	64	48,5	41,4	52,2	51,7	49,1	45,4	43,7	40	36
SF_Med	62,8	48,5	41,4	52,2	51,7	49,1	45,2	43,7	40	36
Kr	59,7	53,8	48,9	56,8	56,5	52,9	49	47,5	43,4	40,8

Tabela 3-2 Percentagens dos índices das técnicas de fusão

Observando os resultados que aparecem na Tabela 3-2, seleccionámos os índices das técnicas de fusão que apresentam melhor desempenho à semelhança do critério aplicado para as CVIs individuais. O conjunto selecionado é composto pelos seguintes métodos: XB, D53, SF_G, SF_H e Kr.

Como podemos observar na Figura 3.11, todos os índices escolhidos apresentam resultados estáveis quando se varia o número de *clusters*: a maioria escolhe sempre bem com uma percentagem superior o 50%.

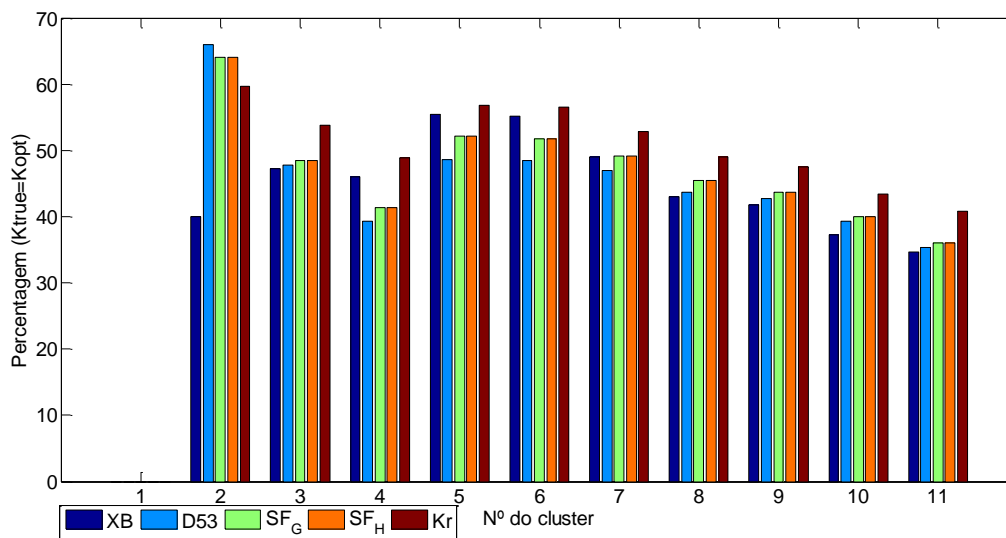


Figura 3.11 Percentagem dos índices XB, D53, SF_G, SF_H, Kr

Fazendo um resumo do conteúdo deste capítulo, podemos concluir que a determinação do número de *clusters* que melhor se adequa ao conjunto de dados, pode ser obtido mediante o uso tanto dos índices de validação (XB e D53), como também dos índices calculados através das técnicas de fusão (SF_G, SF_H e Kr). Por vezes os índices de validação podem devolver mais de uma solução e, nesse caso, seria recomendável analisar visualmente os dados e decidir qual das soluções apresenta uma partição dos dados mais lógica.

Como vemos para o nosso sistema SIMO nem todos os índices disponíveis na literatura, servem para caracterizar o conjunto de dados que representa o canal mas, através da geração de dados sintéticos, conseguimos ter um conjunto de dados suficientemente amplo, para extrair estatísticas que proporcionem informação sobre a taxa de acerto dos índices, conhecendo *a priori* o número de *clusters* gerados, e também se estes índices são suficientemente estáveis independentemente do número de *clusters* dados.

4. Processamento e análise das medidas reais

Neste capítulo apresenta-se o cenário real onde foram realizadas as medidas. Estas medidas foram adquiridas no pavilhão desportivo da Universidade de Aveiro, antes do início deste trabalho. De seguida, explica-se como e onde se fizeram as medidas.

O objectivo deste capítulo é expor o processo completo de tratamento dos dados, desde a aquisição das medidas passando pela obtenção dos parâmetros das MPCs até à classificação das mesmas em interações de primeira ordem ou ordem superior, permitindo assim a caracterização do canal rádio.

Desta forma, poderemos comprovar se as estatísticas obtidas no capítulo anterior, junto com as conclusões extraídas sobre o KPM e o FD-SAGE, são certas e aplicáveis a sistemas reais. Como exemplo optámos por fazer uma análise completa de dois cenários, dos quais um é interior (tanto a antena transmissora como a recetora, encontram-se no interior do pavilhão) e outro em que uma das antenas se encontra no exterior do pavilhão. Assim poderemos ver se existe alguma dificuldade adicional quando estamos a trabalhar em condições em que não temos linha de vista entre o transmissor e o recetor.

Nesta fase de representação de resultados reais, trabalhamos com os centroides dos *clusters*. Poderíamos dizer, que estamos a fazer um estudo de medidas reais inter-*cluster*. Assim unicamente teremos em conta o atraso, o azimute, a elevação e a potência dos centroides dos *clusters* em que as MPCs foram organizadas.

Além disso, estudaremos o comportamento dos *clusters* e dos centroides, no que diz respeito a atraso, azimute e potência, para tentar extrair comportamentos sistemáticos ou tentar ajustar a leis que de alguma forma já foram usadas na caracterização do comportamento destes parâmetros. A informação será frequentemente apresentada de forma gráfica para que seja possível uma análise visual do problema.

4.1 Sistema de medição do canal rádio

As medidas usadas neste estudo do canal, foram adquiridas recorrendo ao sistema representado na Figura 4.1. O sistema consiste numa plataforma de posicionamento (X-Y), com motores passo a passo que permitem posicionar a antena com uma resolução muito elevada, um analisador de redes (HP 8753D), um computador e duas antenas (uma transmissora e outra recetora) tal como é descrito em [2].

Este tipo de sistema permite adquirir medidas SIMO. Além disso, para o nosso caso as posições do recetor e transmissor foram permutadas para obter medidas SIMO bidirecionais.

As medidas foram obtidas com uma largura de banda de 200 MHz centradas em 2 GHz. Portanto, isto implica que temos uma resolução temporal de 5 ns, e uma resolução espacial de 1.5 m. A potência transmitida foi de 10 dBm chegando nalguns casos até aos 14 dBm.

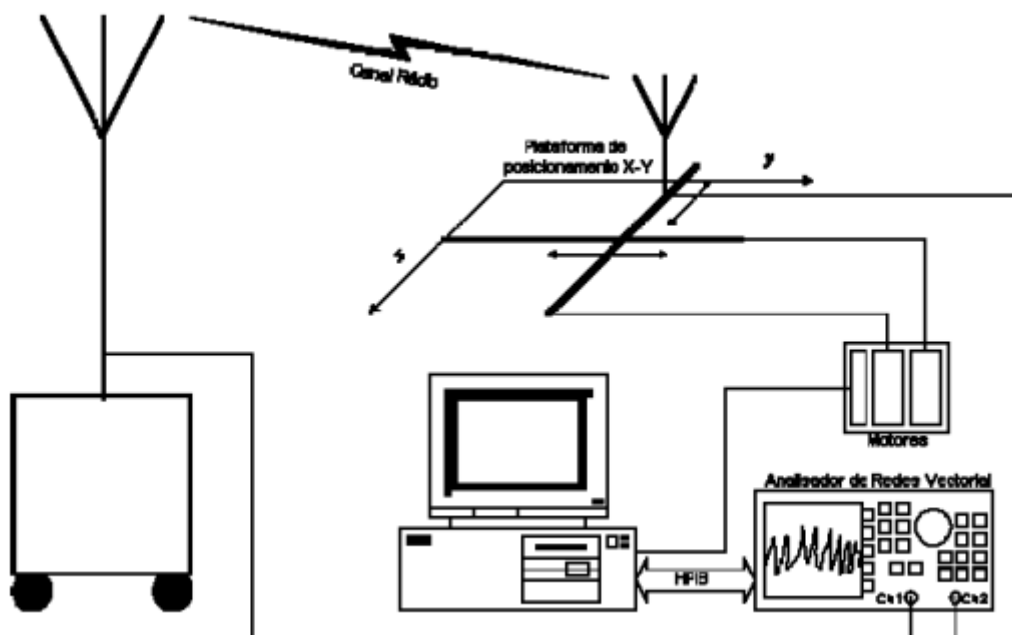


Figura 4.1 Diagrama do sistema utilizado para medições do canal direcional

4.1.1 Cenário interior e interior-exterior

Nesta secção analisaremos dois cenários em que num caso existirá LOS entre as duas antenas. Este caso está esquematizado na Figura 4.2.

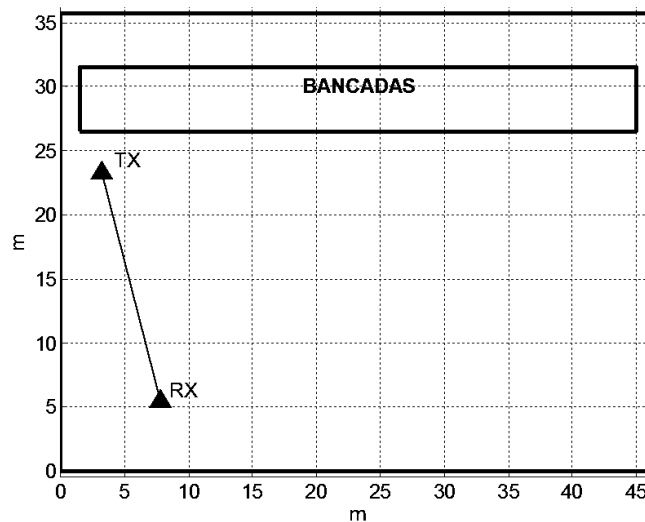


Figura 4.2 Cenário interior 1 com LOS.

Na Figura 4.3 temos a representação gráfica do cenário interior-exterior que analisaremos, o qual consiste num cenário NLOS.

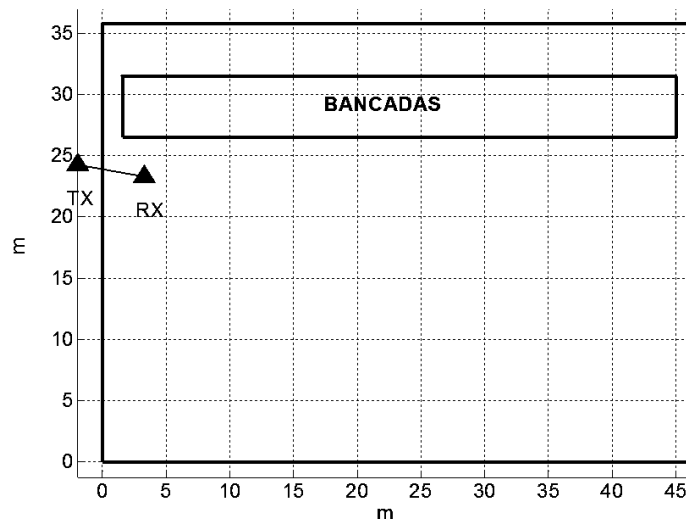


Figura 4.3 Cenário 2 interior-exterior com NLOS.

Na tabela seguinte temos representadas as posições reais do TX (Antena Transmissora) e do RX (Antena Recetora), para o cenário interior.

	TX [x,y]	RX [x,y]
Cenario1_LOS	[3.26, 23.3 m]	[7.80, 5.45 m]

Tabela 4-1 Coordenadas TX-RX para o cenário interior.

Na tabela seguinte temos representadas as posições reais do TX (Antena Transmissora) e do RX (Antena Recetora), para o cenário interior-exterior com NLOS.

	TX [x,y]	RX [x,y]
Cenario2_NLOS	[-1.98, 24,27 m]	[3.26, 23.3 m]

Tabela 4-2 Coordenadas TX-RX para o cenário interior-exterior.

O processo que iremos seguir para fazer a análise dos cenários é o seguinte:

1. Análise dos gráficos depois de executar o FD-SAGE.
2. Análise dos gráficos depois de executar o KPM.
3. Resultados das medidas de validação e das técnicas de fusão.
4. Estudo do comportamento do atraso, da potência e do azimute para os *clusters*.
5. Representação mediante elipses do traçado dos raios dos *clusters* para os raios do cenário TX-RX e RX-TX e classificação das reflexões.

4.2 Resultado do FD-SAGE para os dados reais

Nesta secção analisaremos os resultados obtidos depois de executar o FD-SAGE para medidas adquiridas.

Para todos os casos estudaremos tanto o comportamento da medida em que temos TX-RX (Ensaio Direto), como no que temos RX-TX (Ensaio Reverso), que corresponde à permuta da posição do TX pela do RX e vice-versa.

4.2.1 Resultado do FD-SAGE para o cenário interior

Nas figuras seguintes, estamos a representar as estimativas do FD-SAGE em conjunto com as medições reais. Na Figura 4.5 está representado o azimuth, o atraso e a potência das várias MPCs estimadas pelo FD-SAGE.

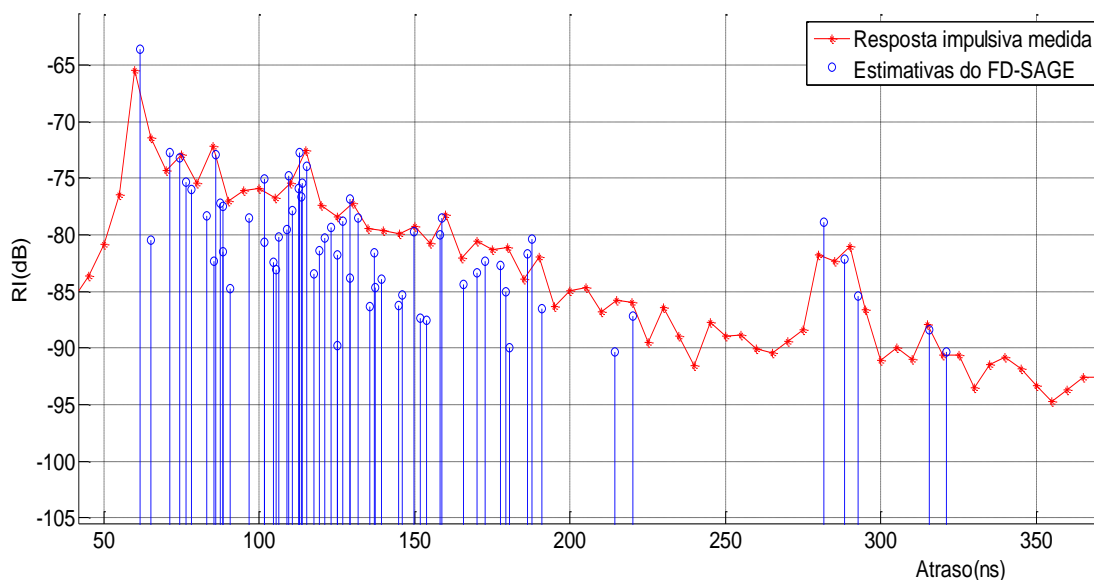


Figura 4.4 Resposta Impulsiva e estimativas do FD_SAGE no cenário 1 interior (DIRETO) com LOS.

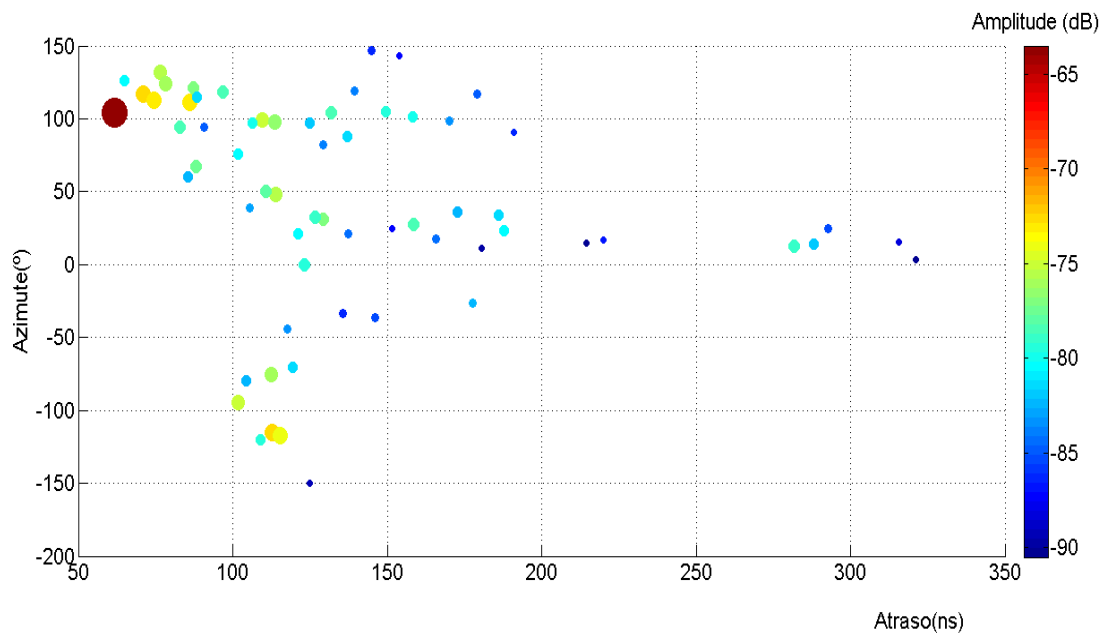


Figura 4.5 Estimativas do FD-SAGE no cenário 1 interior (DERETO) com LOS.

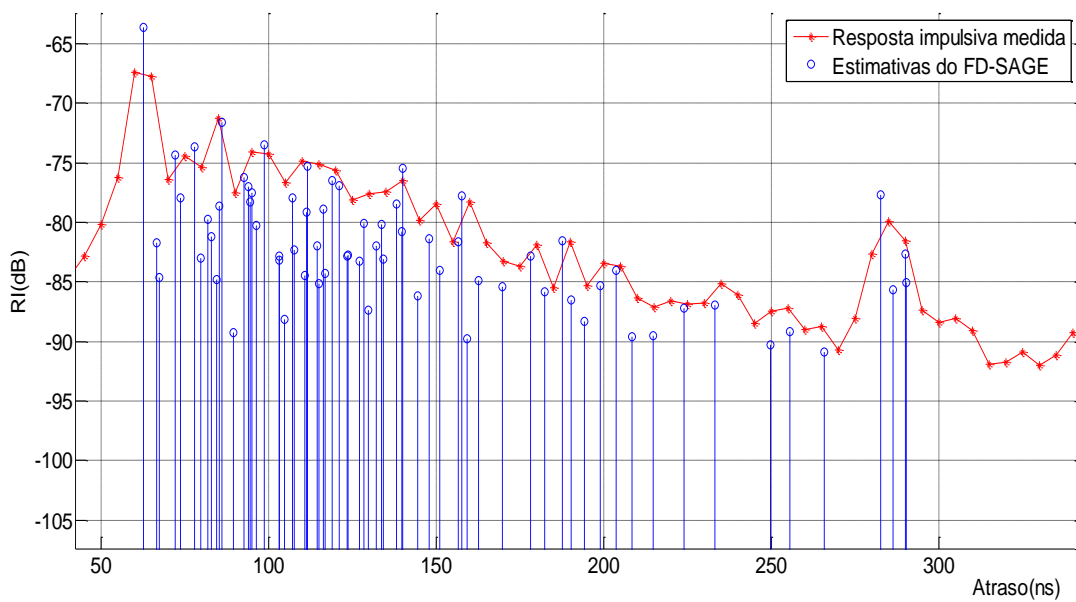


Figura 4.6 Resposta Impulsiva e estimativas do FD_SAGE no cenário 1 interior (REVERSO) com LOS.

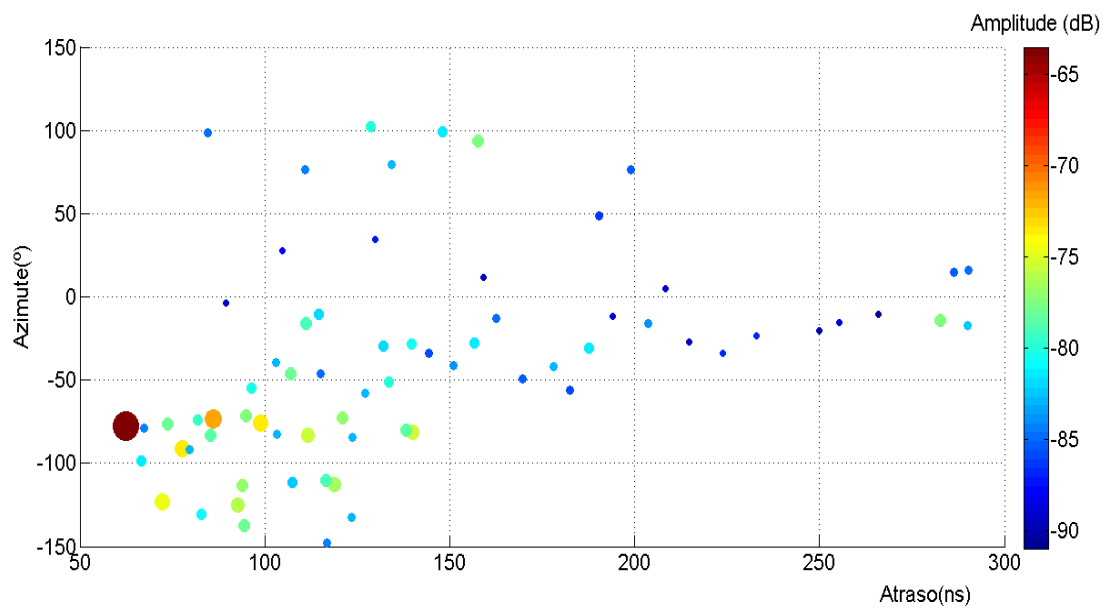


Figura 4.7 Estimativas do FD-SAGE no cenário 1 interior (REVERSO) com LOS.

Observando as figuras anteriores conclui-se que o FD-SAGE não é capaz de estimar todas as componentes, mas normalmente é capaz de estimar bem aquelas que superam certo limiar de potência. Na secção 5.2, analisamos a capacidade do FD-SAGE para estimar componentes que apresentam uma potência débil.

Analisando os gráficos das estimativas do FD-SAGE, existe uma componente que tem muito mais amplitude que as restantes. O que pode estar a acontecer é que esta componente esteja a representar o raio direto entre o TX-RX, já que é a componente que tem maior amplitude e um atraso menor, neste caso em que temos LOS seria de esperar.

Como veremos na secção 4.3, necessitaremos de trocar a referência dos eixos de coordenadas, para poder esperar assim nos casos em que temos LOS, que o raio direto corresponda ao azimuth 0° .

4.2.2 Resultado do FD-SAGE para o cenário interior-exterior

Nos gráficos seguintes aparecem representados a resposta impulsiva das medidas para um cenário com NLOS.

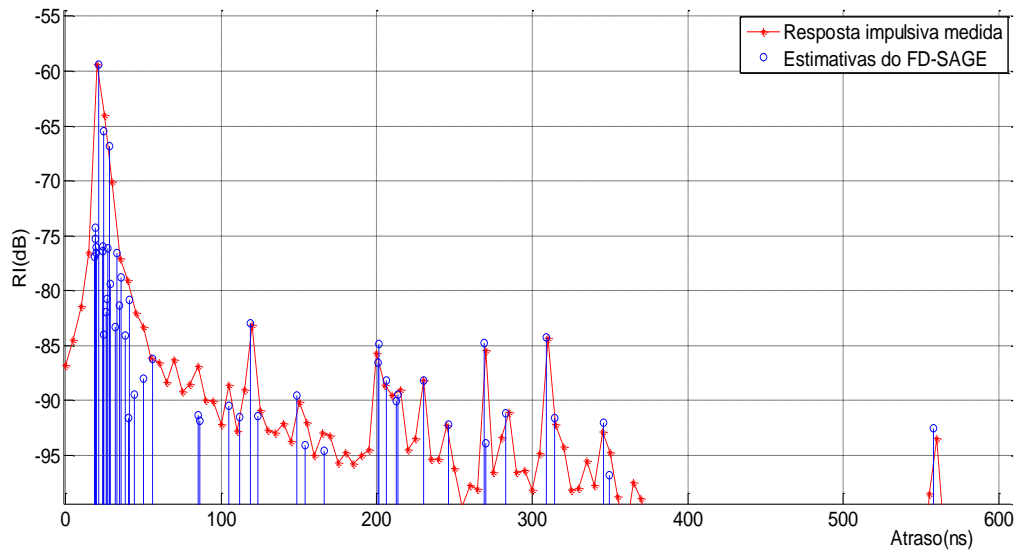


Figura 4.8 Resposta Impulsiva e estimativas do FD_SAGE no cenário 2 interior-exterior (DIRETO) com NLOS.

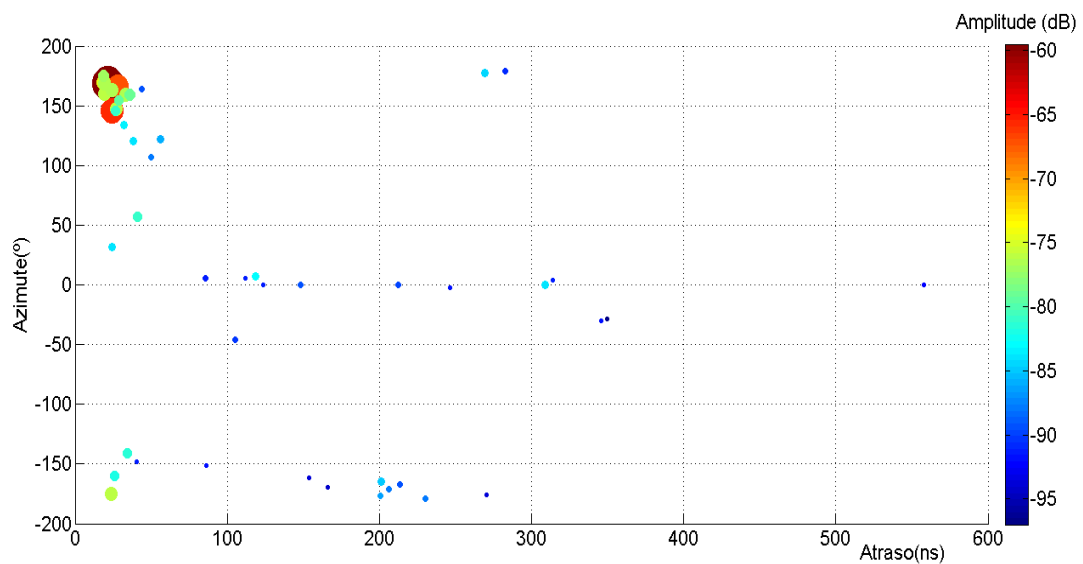


Figura 4.9 Estimativas do FD-SAGE no cenário 2 interior-exterior (DIRETO) com NLOS.

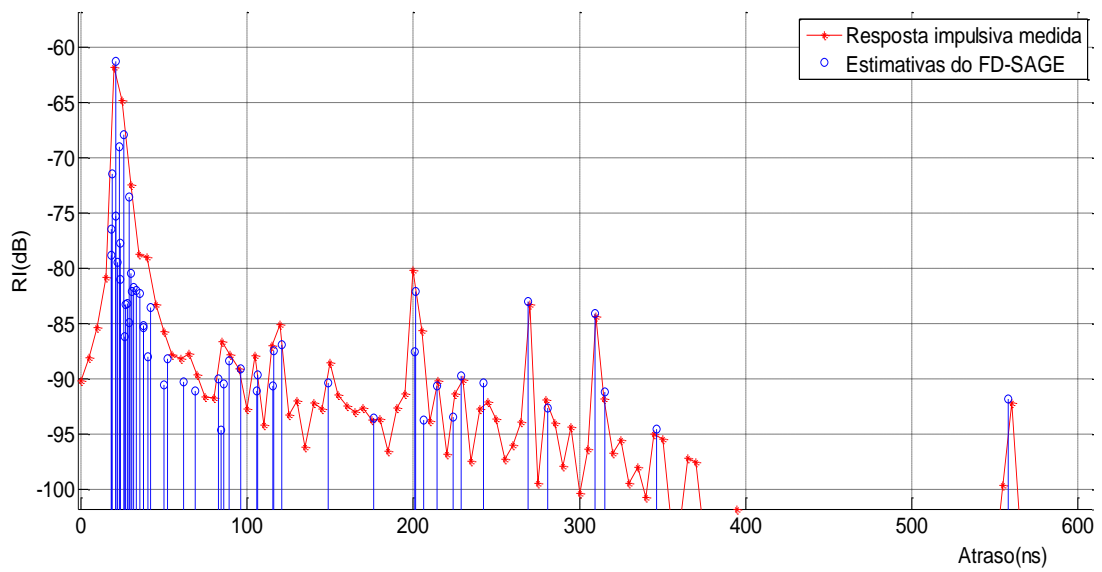


Figura 4.10 Resposta Impulsiva e estimativas do FD_SAGE no cenário 2 interior-exterior (REVERSO) com NLOS

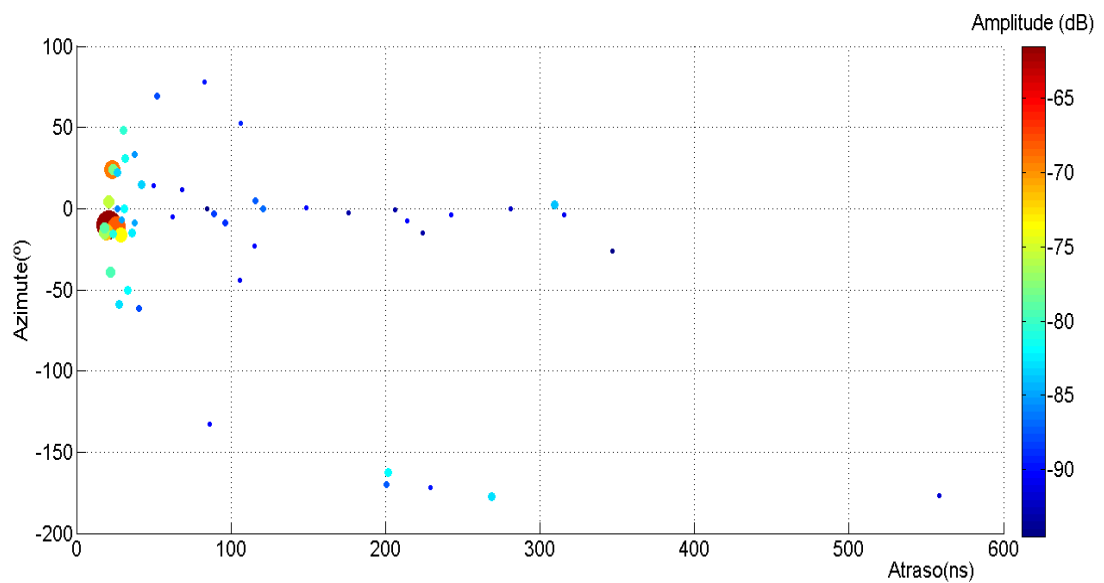


Figura 4.11 Estimativas do FD-SAGE no cenário 2 interior-exterior (REVERSO) com NLOS.

4.3 Resultados do KPM e das medidas de validação e os índices das técnicas de fusão.

Nesta secção analisaremos os resultados que devolvem os índices de validação (XB, D53) e os índices das técnicas de fusão (SF_G, SF_H e Kr), para cenários em que temos LOS e NLOS.

Para poder fazer uma melhor análise visual, depois de fazer o *clustering* com o algoritmo KPM, o azimuth de cada MPCs foi referenciado em relação à reta que une o recetor e o transmissor. Desta forma o raio direto, se existir, apresenta azimuth igual a 0°. Inicialmente o azimuth é obtido em relação ao sistema de eixos do agregado virtual formado no recetor.

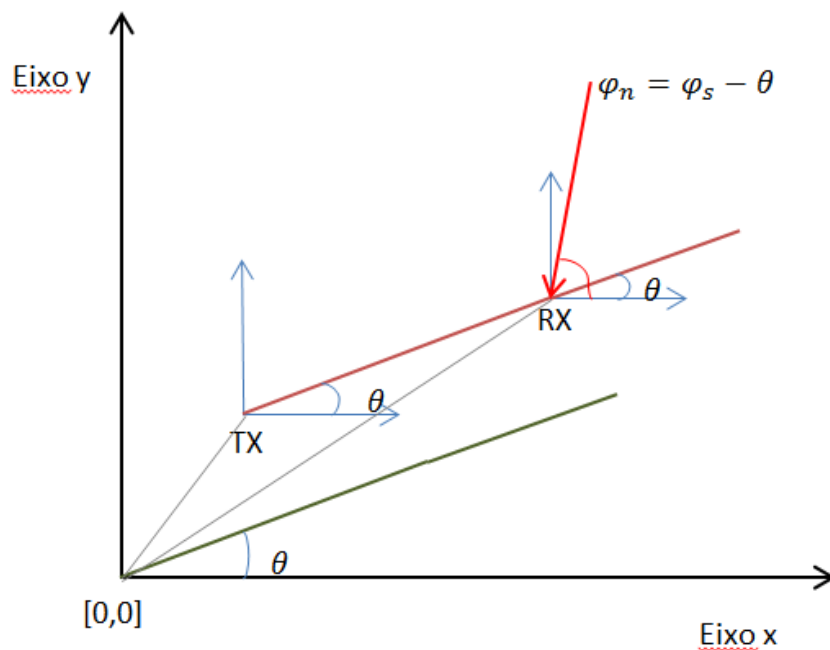


Figura 4.12 Mudança de referencial angular.

O procedimento seguido para efetuar a mudança de referencial é o seguinte:

- Subtrair as coordenadas do (TX-RX).
- Converter o resultado das novas coordenadas $[x, y]$ em complexas ($z = x + j * y$).

- Depois calculamos o ângulo para estas coordenadas ($\theta = \text{angle}(z)$).
- φ_s Representa o ângulo de chegada da MPC em relação ao referencial do RX.
- O novo ângulo de chegada da MPC vem dado por: $\varphi_n = \varphi_s - \theta$.

Nas figuras seguintes temos um exemplo de como seria uma representação dos dados antes e depois da mudança de referencial, para um cenário em que temos linha de vista entre a antena transmissora e a recetora.

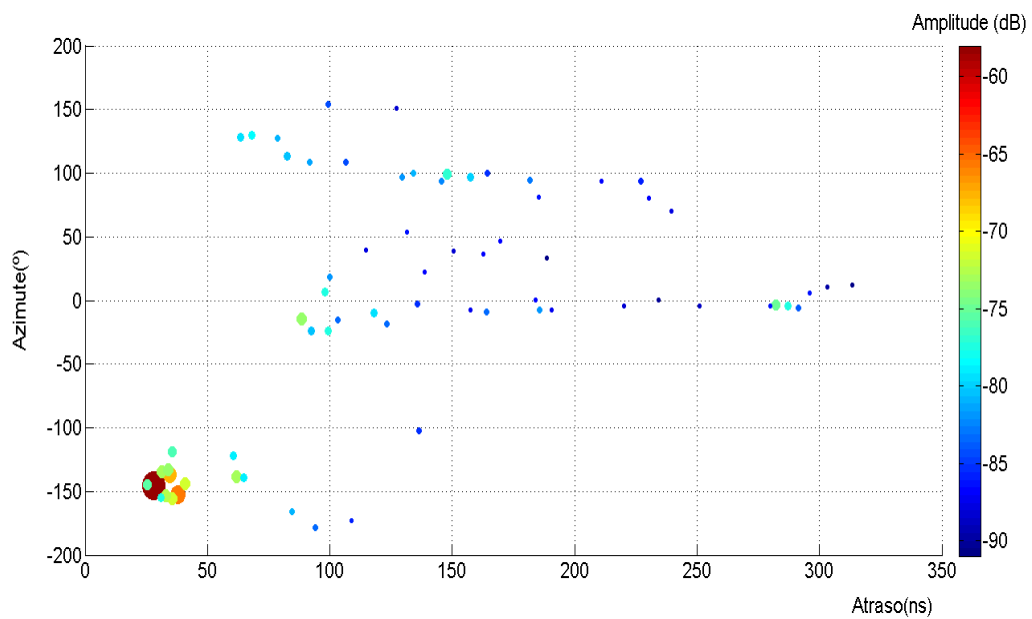


Figura 4.13 Exemplo de dados representados referidos ao ponto [0,0]

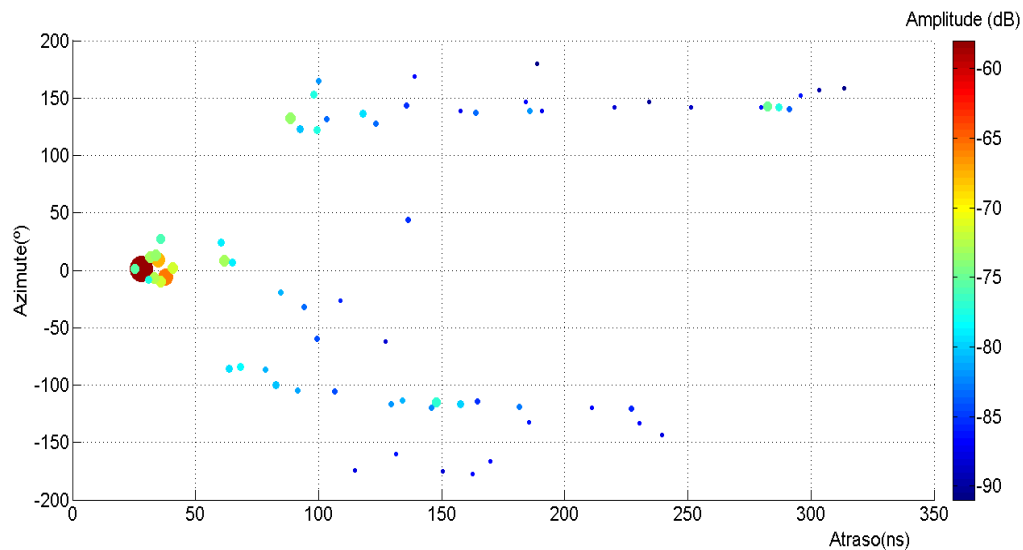


Figura 4.14 Exemplo de dados rotados referidos à recta que une o TX-RX.

Como vemos, nos gráficos anteriores, aplicando esta mudança de referencial, podemos fazer uma ideia de como é que chegam os raios ao recetor e também o atraso que tem o raio direto, já que este terá azimute de 0°.

4.3.1 Resultado dos índices de validação e o KPM para o cenário interior

CENARIO 1 INTERIOR (DIRETO) COM LOS

Na Figura 4.15 temos os resultados devolvidos pelas técnicas de fusão seleccionadas, enquanto na Figura 4.16 se apresentam os resultados dos CVIs. Os resultados mostram que as soluções com 4 e 6 *clusters* são as melhores. Fazendo uma análise visual dos resultados do KPM para $K=4$ e $K=6$ *clusters*, já que não temos uma solução única, optamos por escolher a solução de $K=6$, Figura 4.17, pois visualmente parece ser aquela que faz mais sentido em termos físicos.

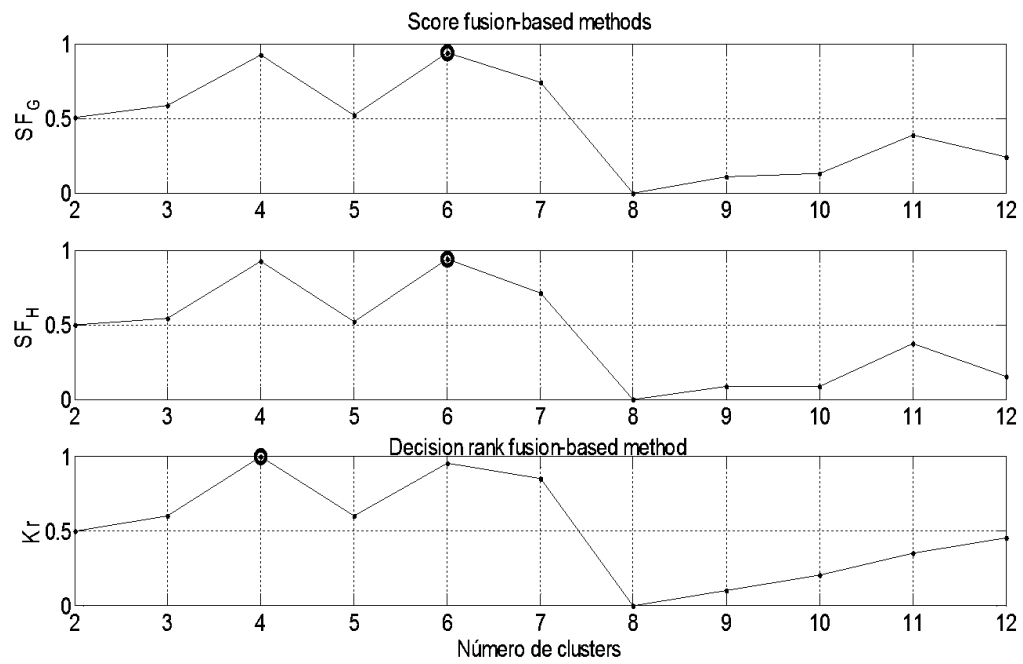


Figura 4.15 Índice das técnicas de fusão para o cenário 1 interior (DIRETO) com LOS.

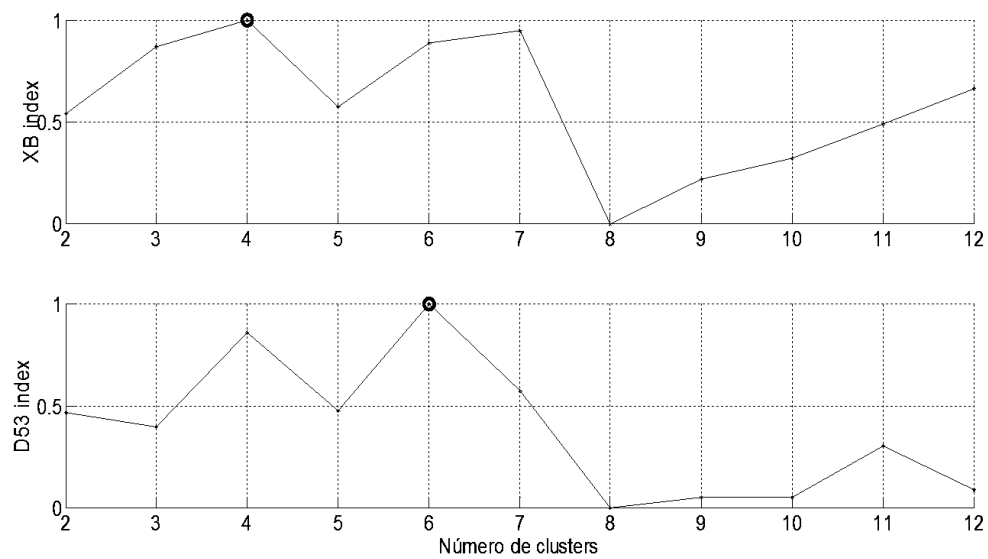


Figura 4.16 Índice das CVIs para o cenário 1 interior (DIRETO) com LOS.

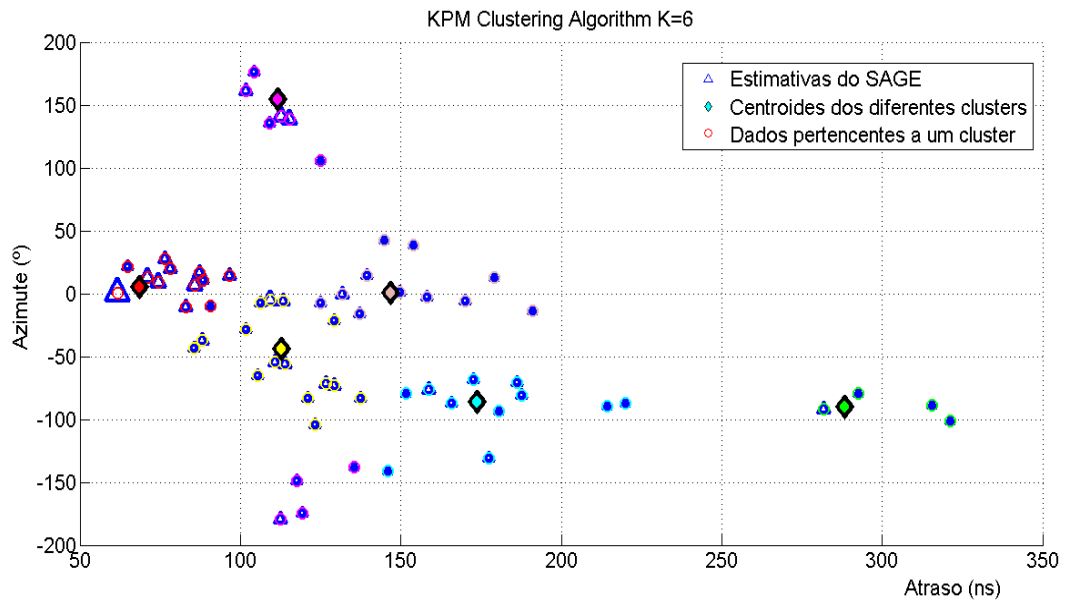


Figura 4.17 *Clustering* para o cenário 1 interior (DIRETO) com LOS e K=6 *cluster*.
CENÁRIO 1 INTERIOR (REVERSO) COM LOS

Como podemos observar na Figura 4.18 as técnicas de fusão escolhem a solução com dois *clusters* como a melhor para o conjunto de dados da Figura 4.20 e os CVIs da Figura 4.19 também escolhem o mesmo resultado.

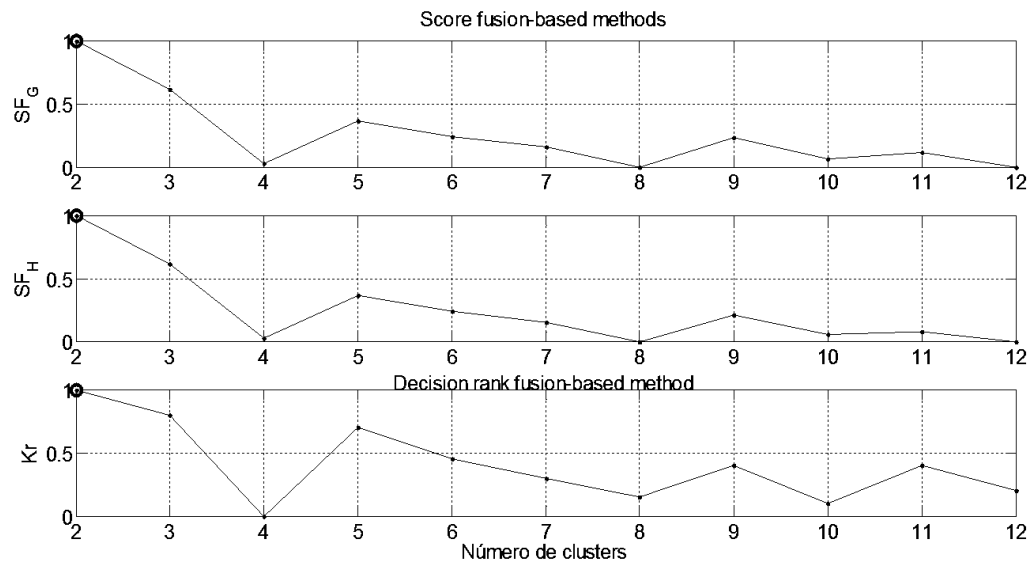


Figura 4.18 Índice das técnicas de fusão para o cenário 1 interior (REVERSO) com LOS.

Fazendo uma inspeção visual do espalhamento que apresentam os dados, podemos dizer que dois *clusters* não representam a melhor solução como classificação das MPCs. Assim, analisaremos outras possibilidades, que podem ser as segundas escolhas feitas pelos CVIs e pelas técnicas de fusão.

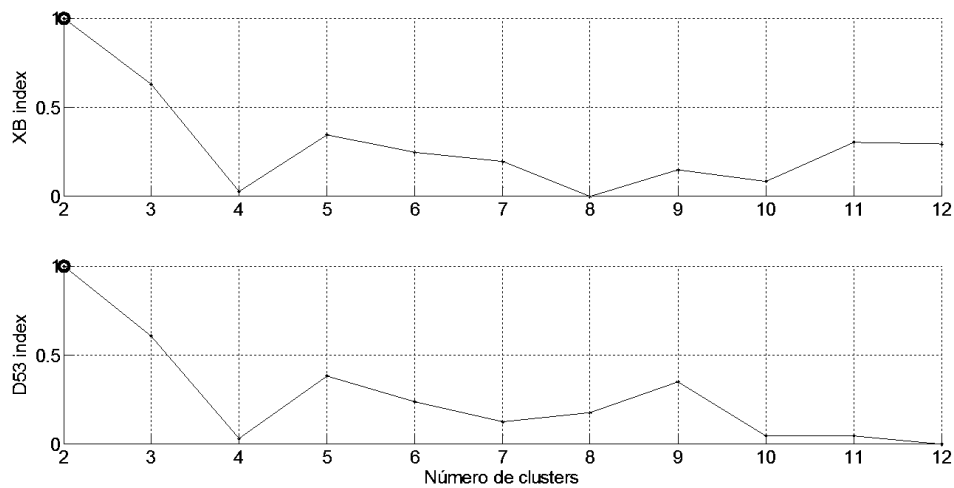


Figura 4.19 Índice das CVIs para o cenário 1 interior (REVERSO) com LOS.

Na Tabela 4-3 onde analisamos o Cenário 1 (REVERSO), vemos o ranking das soluções escolhidas por todos os índices. Deste ranking podemos concluir que a solução com três *clusters* se encontra em segundo lugar ao passo que em terceiro lugar temos a solução com cinco *clusters* que foi efetivamente a solução escolhida.

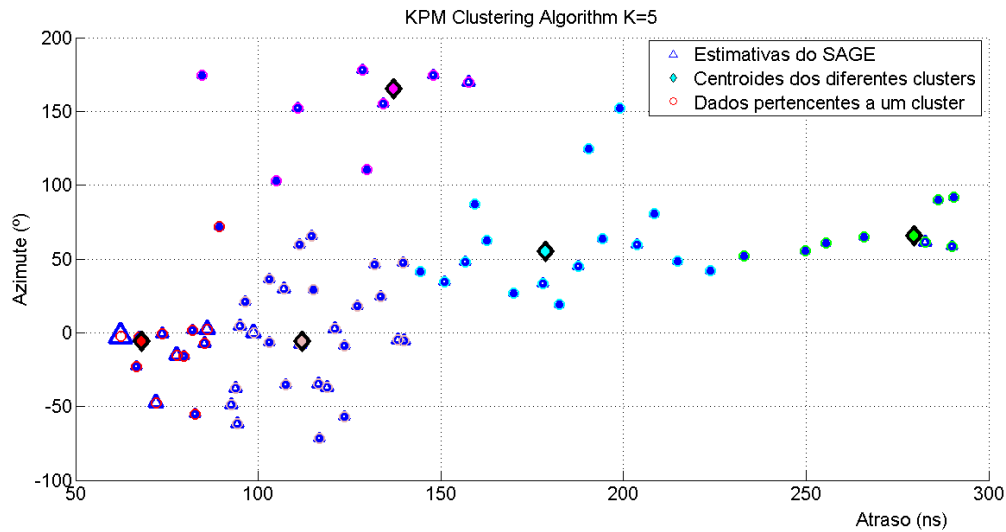


Figura 4.20 *Clustering* para o cenário 1 interior (REVERSO) com LOS e K=5 *cluster*.

	Cenário 1 (DIRETO)	Cenário 1 (REVERSO)
SF_G índice	6	2, [3, 5]
SF_H índice	6	2, [3, 5]
Kr índice	4	2, [3, 5]
XB índice	4	2, [3, 5, 11]
D53 índice	6	2, [3, 5, 9]
Nº de <i>clusters</i> escolhidos	6	5

Tabela 4-3 Índices de validação e nº de *clusters* escolhidos para o cenário 1 interior

4.3.2 Resultado dos índices de validação e o KPM para o cenário interior-exterior

CENARIO2 INTERIOR –EXTERIOR (DIRETO) COM NLOS

Como podemos observar na Figura 4.21 as técnicas de fusão escolhem a solução com seis *clusters*. Na Figura 4.22 vemos que o índice D53 escolhe seis *clusters* como a

solução ótima, estando assim de acordo com o escolhido pelas técnicas de fusão. No entanto, o índice XB escolhe nove *clusters* como melhor solução.

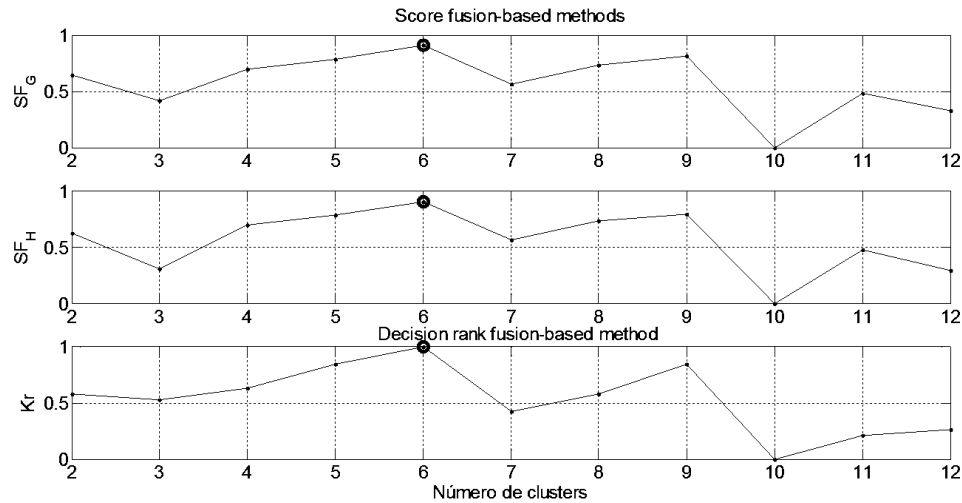


Figura 4.21 Índice das técnicas de fusão para o cenário 2 interior-exterior (DIRETO) com NLOS.

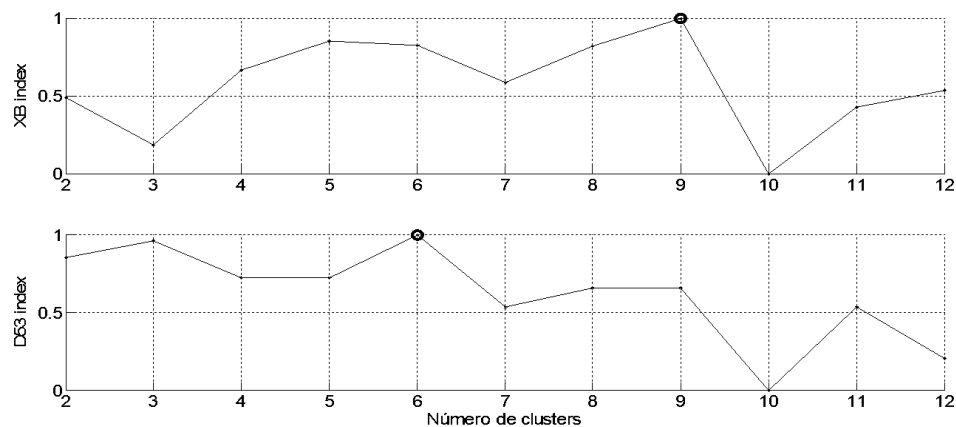


Figura 4.22 Índice das CVIs para o cenário 2 interior-exterior (DIRETO) com NLOS.

Se fizermos uma análise visual da Figura 4.23, concluímos que a solução de cinco *clusters*, visualmente, é a que faz mais sentido já que a solução de seis *clusters*, como se pode observar no anexo Figura_Anexo 1, cria um *cluster* com duas componentes apenas, o que não faz muito sentido, pois a potência destas duas componentes não é tão relevante.

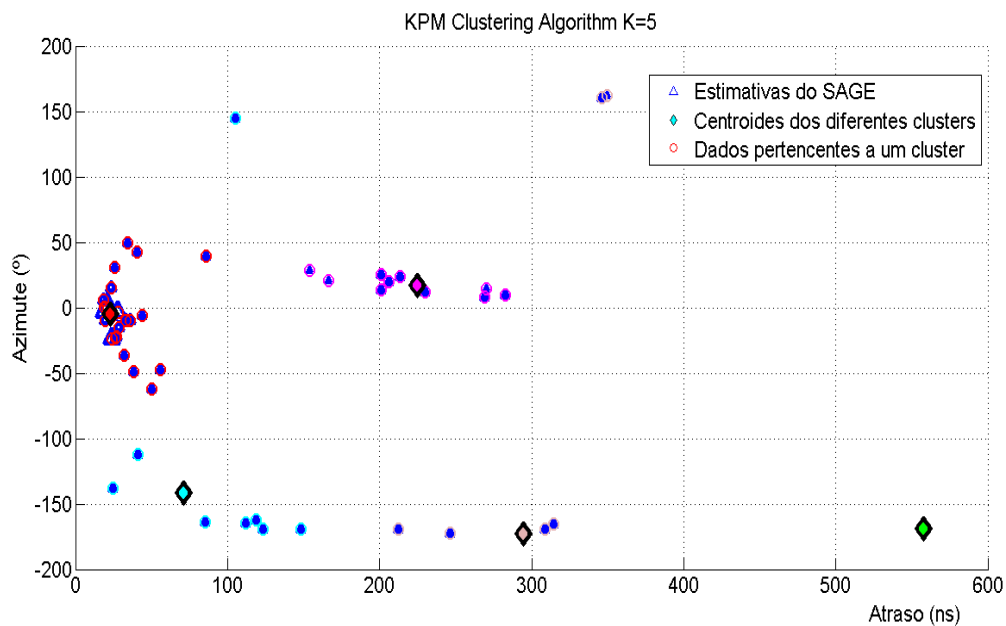


Figura 4.23 *Clustering* para o cenário 2 interior-exterior (DIRETO) com NLOS e K=5 *cluster*.

CENÁRIO 2 INTERIOR-EXTERIOR (REVERSO) COM NLOS

Da mesma maneira que nas secções anteriores, iremos analisar o cenário 2 reverso. Na Figura 4.24 podemos observar que as técnicas de fusão elegem a solução com dois *clusters*.

No entanto se observarmos a Figura 4.26, concluímos que dois *clusters* não são suficientes para representar bem o comportamento dos dados, já que temos algumas MPCs muito atrasadas em relação às restantes e também temos outras com diferenças muito grandes em azimuth. Assim, analisaremos as soluções que devolvem os índices dos CVIs, XB e D53.

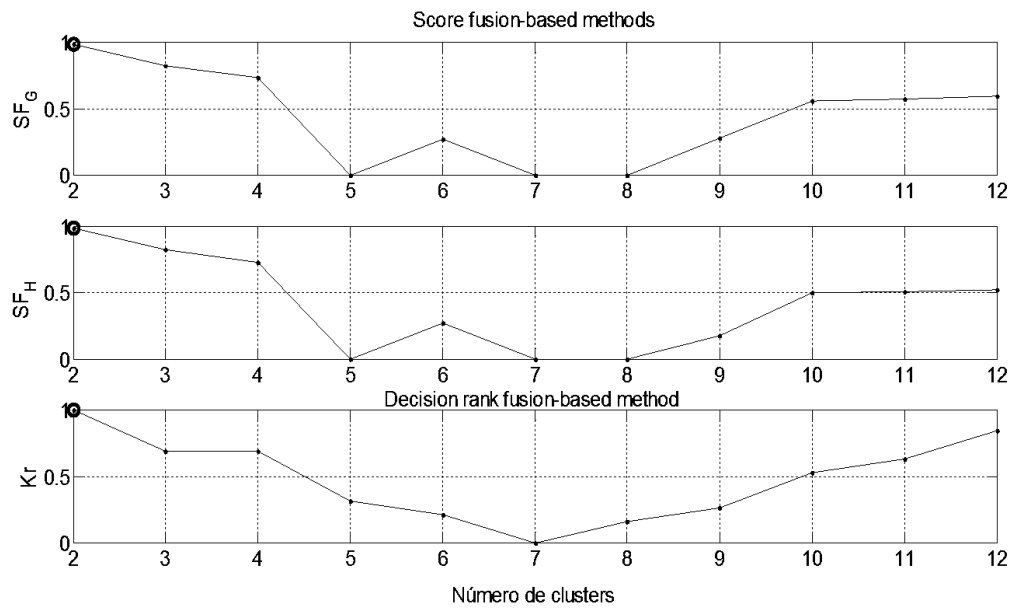


Figura 4.24 Índice das técnicas de fusão para o cenário 2 interior-exterior (REVERSO) com NLOS.

Como vemos na Figura 4.25 o índice D53 escolhe dois *clusters* como a melhor solução, ao passo que o índice XB escolhe a solução com doze *clusters* como solução ótima. Estas soluções situam-se nos valores extremos do intervalo onde se pesquisa o número de *clusters*.

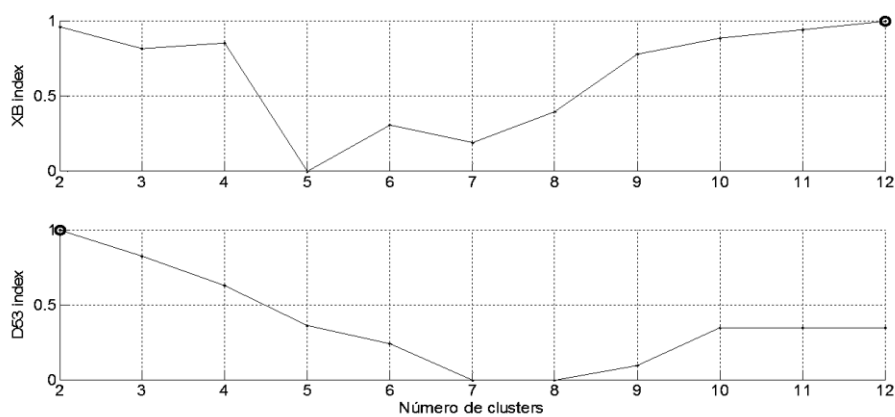


Figura 4.25 Índice das CVIs para o cenário 2 interior-exterior (REVERSO) com NLOS.

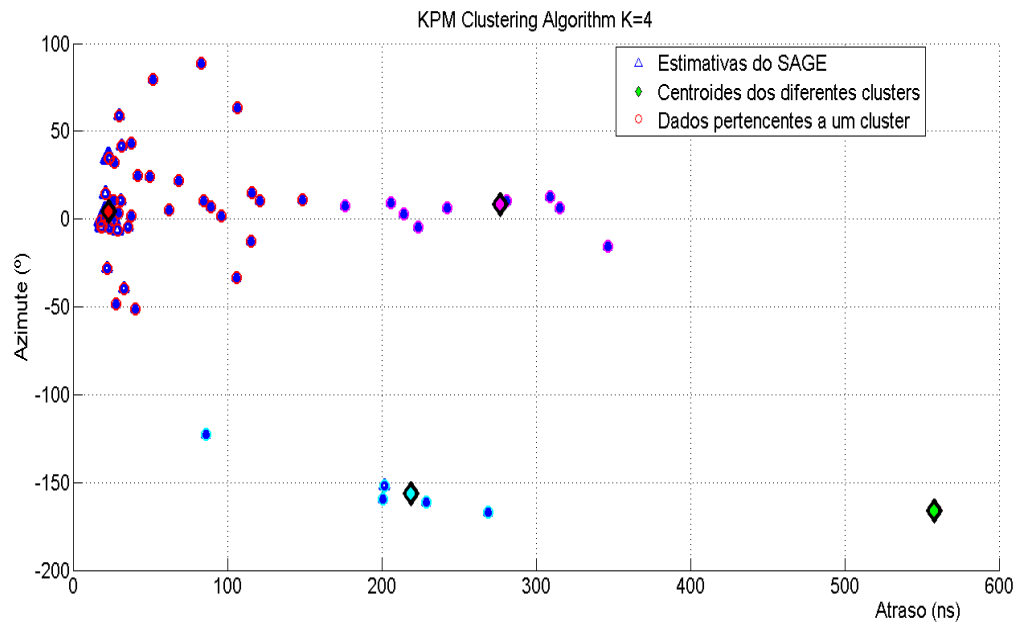


Figura 4.26 *Clustering* para o cenário 2 interior-exterior (REVERSO) com NLOS e K=4 *cluster*.

Conforme exposto anteriormente, a solução ótima, não é a que melhor representa a distribuição dos dados. Assim na Tabela 4-4, apresentamos outras possíveis soluções obtidas a partir do ranking ditados pelos índices. Escolhemos a solução com cinco *clusters* como a que melhor representa o cenário 2 (DIRETO) e quatro *clusters* para o cenário 2 (REVERSO).

	Cenário 2 (DIRETO)	Cenário 2 (REVERSO)
SF_G índice	6, [5, 9]	2, [3, 4]
SF_H índice	6, [5, 9]	2, [3, 4]
Kr índice	6, [5, 9]	2, [3, 4]
XB índice	9, [8, 5,6]	12, [2, 11, 10, 4]
D53 índice	6, [2, 3, 5]	2, [3, 4]
Nº de <i>clusters</i> escolhidos	5	4

Tabela 4-4 Índices de validação e nº de *clusters* escolhidos para o cenário 2 interior-exterior.

4.4 Comportamento das reflexões dos raios

Nesta secção analisa-se, através duma representação gráfica, o comportamento dos raios dentro do cenário em que nos encontramos. É importante salientar que, de forma semelhante à secção anterior, estamos a fazer um estudo inter-*cluster*. Os gráficos seguintes irão representar os centroides dos *clusters*, para as soluções obtidas para cada cenário da secção 4.3.

Baseando-nos numa representação gráfica que aparece na literatura [3], onde as elipses, representam o atraso dum centroide e a reta que une um ponto da elipse com o ponto que representa a posição do recetor, é o raio de chegada, obtemos uma representação muito clara de onde é que têm origem as reflexões. O tempo que o raio direto demora a percorrer a distância entre a antena transmissora e a recetora pode ser calculado da forma seguinte:

$$t_{raio_directo} = \frac{\sqrt{(xT - xR)^2 + (yT - yR)^2}}{0.3} [ns] \quad (4.1)$$

$$AOA = \arctan\left(\frac{(xT - xR)}{(yT - yR)}\right) * \left(\frac{180}{\pi}\right) [rad] \quad (4.2)$$

Aplicando estas fórmulas para os cenários com os que estamos a trabalhar, obtemos os seguintes resultados apresentados na Tabela 4-5.

	TX [x,y]-Rx[x,y] [m]	$t_{raio_directo}$ [ns]	AOA [°]
Cenario1_LOS (Direto)	[-4.54, 17.85]	26,44070935	104,2701333
Cenario1_LOS (Reverso)	[4.54, -17.85]	26,44070935	-75,72986671
Cenario2_NLOS (Direto)	[-5.24, 0,97]	17,76341434	169,5124385
Cenario2_NLOS Reverso)	[5.24, -0,97]	17,76341434	-10,48756149

Tabela 4-5 Resultados do atraso e o azimuth para a distância percorrida do raio direto nos cenários 1 e 2.

Para a classificação das reflexões produzidas nos cenários representamos, num mesmo gráfico, tanto os raios para o cenário (DIRETO) como para o cenário (REVERSO). Desta forma podemos dizer que se ambas elipses se sobrepõem é porque têm o mesmo atraso e ambos raios partem de um mesmo ponto e para os dois cenários é esse ponto em que ocorre uma reflexão.

A análise dos cenários é a seguinte, em primeiro lugar teremos a representação num mesmo gráfico, tanto dos raios para o cenário DIRETO como para os raios do cenário REVERSO.



		Exemplo
D	Cenário DIRETO	D3-Centroide 3 no cenário DIRETO - 'o'
R	Cenário REVERSO	R3-Centroide 3 no cenário REVERSO - '*'
TX	Antena Transmissora	TX 
RX	Antena Receptora	RX 
K	Número de <i>clusters</i> da solução escolhida no cenário DIRETO	K=5 → Escolhemos como solução cinco <i>clusters</i> para representar os raios dos centroides do cenário DIRETO.
Krv	Número de <i>clusters</i> da solução escolhida no cenário REVERSO	Krv=5 → Escolhemos como solução cinco <i>clusters</i> para representar os raios dos centroides do cenário REVERSO.

Tabela 4-6 Informação necessária para a interpretação dos gráficos das elipses.

Nos seguintes gráficos a letra **D (DIRETO)** representa o raio que vai do recetor quando estamos no cenário DIRETO e o número que a acompanha é o número do centroide que estamos a representar, o mesmo acontece para o cenário REVERSO, usando neste caso a

letra **R**. Também **K**-representa a solução de *clusters* escolhida para o cenário DIRETO e **Krv**- representa a solução de *clusters* escolhida para o cenário REVERSO.

A nossa análise trata de determinar se fazendo o intercâmbio das posições do TX e do RX, as reflexões se produzem nos mesmos pontos, tendo em conta que se ambas elipses têm o mesmo atraso e os dois apresentam o centroide no mesmo lugar, podemos dizer que o caminho que percorreu um raio, tanto no cenário DIRETO como REVERSO é o mesmo.

Para fazer uma classificação do tipo de reflexões que estão a acontecer no cenário, demos os seguintes passos:

- 1- **Filtragem por atraso:** Neste passo fazemos uma atribuição entre os centroides do cenário DIRETO com os centroides do cenário REVERSO que se encontram num intervalo de entre $[\pm 10 \text{ ns}]$, do atraso de um dado centroide. Como resultado deste processo, teremos um gráfico com os centroides emparelhados pelo atraso e outro com os desemparelhados em atraso. Este processo é automático e não precisa de supervisão.
- 2- **Filtragem em azimuth:** Uma vez que já temos os centroides emparelhados pelo atraso, fazemos uma atribuição manual, daqueles que emparelham pelo azimuth, dando lugar assim a emparelhamentos perfeitos em azimuth, que são aqueles que têm o mesmo azimuth ou diferem em poucos graus, ou emparelhamentos em azimuth não perfeitos, que são aqueles que têm um atraso semelhante mais os raios dos centroides provêm de azimuths distintos.
- 3- **Resto:** Aqueles que não emparelharam por atraso mas podem ter azimuths parecidos ou aquelas que não emparelharam nem em atraso nem em azimuth.

Tendo em conta o anterior teremos cinco gráficos para cada cenário.

4.4.1 Representação mediante elipses para o cenário interior

Como vemos na Figura 4.27 estamos a representar o cenário 1. As elipses correspondem-se com os atrasos associados a um centroide. Os pontos onde se situam os centroides ('*', 'O'), são os lugares de onde são refletidos os raios que saem do TX para o RX.

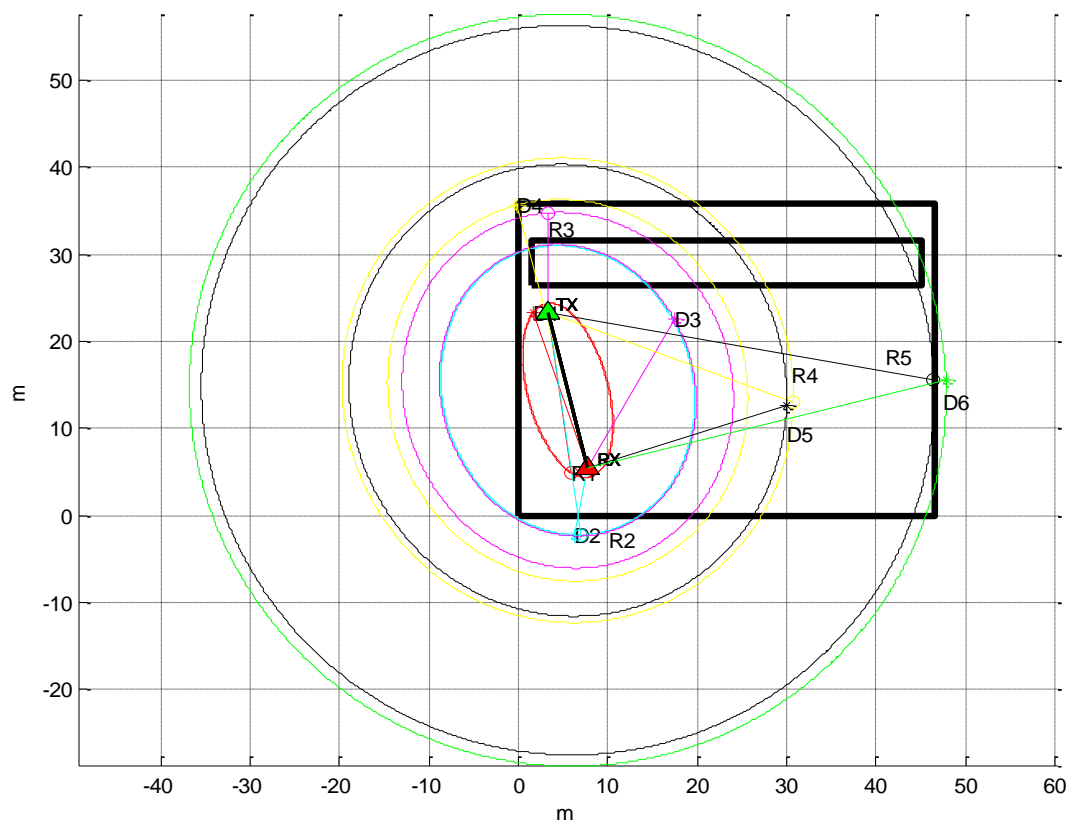


Figura 4.27 Gráfico de Elipses cenário 1 (DIRETO e REVERSO) com LOS para $K=6$ e $K_{rv}=5$.

De seguida é aplicada a filtragem por atraso, obtendo os seguintes gráficos:

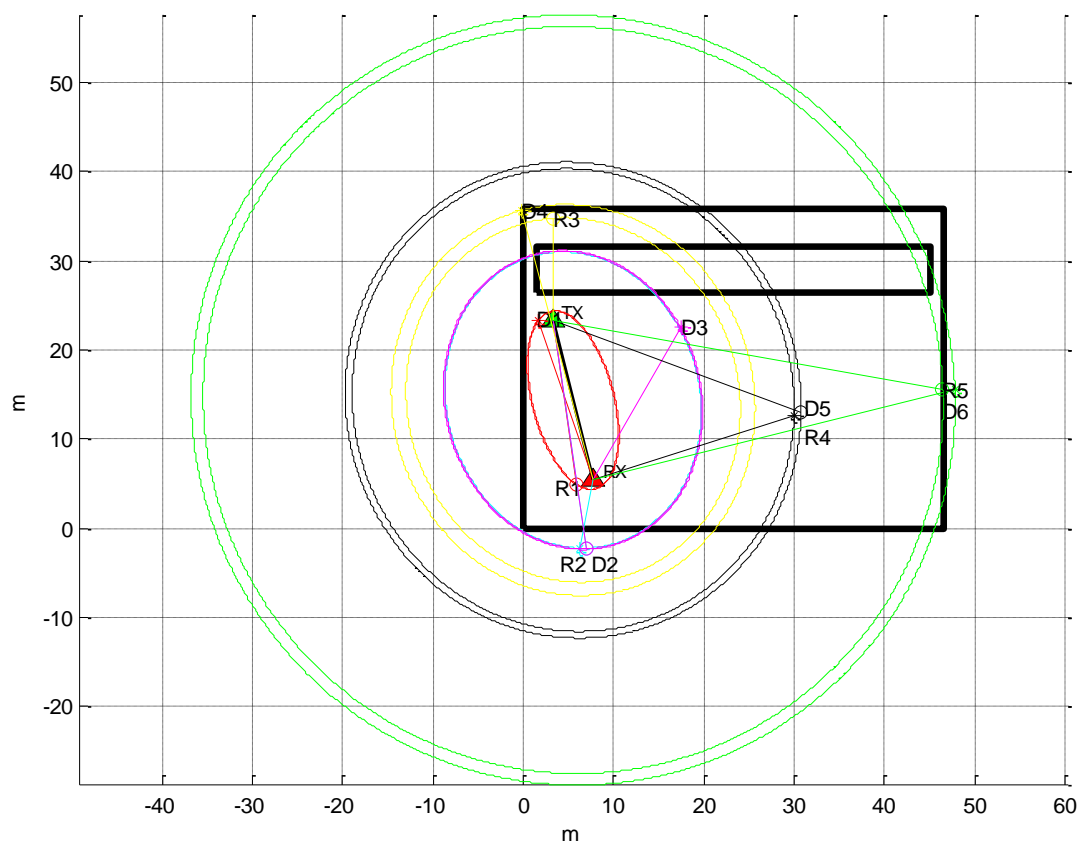


Figura 4.28 Gráfico de elipses cenário 1 (DIRETO e REVERSO) com LOS. Depois de fazer um emparelhamento por atraso.

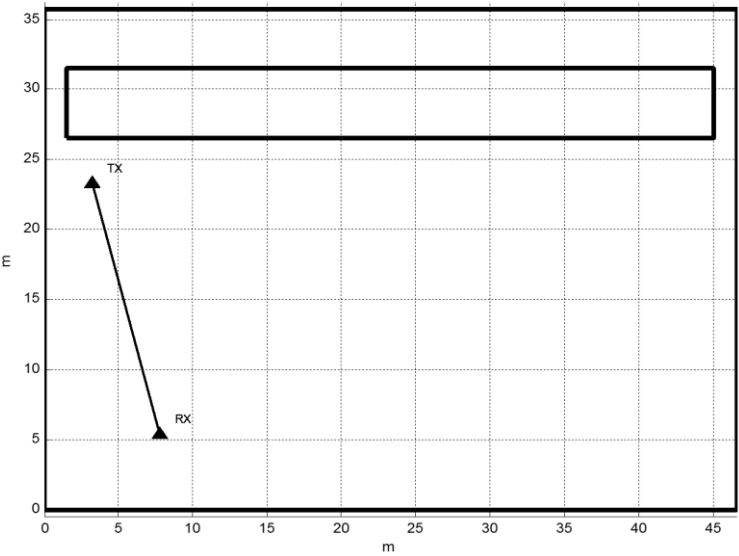


Figura 4.29 Gráfico de elipses desemparelhadas em atraso para o cenário 1 (DIRETO e REVERSO) com LOS. Depois de fazer uma filtragem por atraso.

A continuação é aplicada a filtragem por azimuth para aquelas que já emparelharam em atraso, obtendo os seguintes gráficos:

FILTRAGEM POR ATRASO (inter [-10ns 10ns])				FILTRAGEM POR AZIMUT			
EMPARELHADOS POR ATRASO		DESEMPARELHADOS	POR ATRASO	EMP. PERFEITOS	EMP. NÃO PERFEITOS	NÃO EMPARELHADOS	
DEREITO	REVERSO	DEREITO	REVERSO	REVERSO	REVERSO	DEREITO	REVERSO
1	1			1			
2	2			2			
3	2					3	
4	3			3			
5	4			4			
6	5			5			

Tabela 4-7 Resultados dos emparelhamentos das elipses para o cenário1, depois de aplicar as filtragens em atraso e azimuth.

Como vemos na Tabela 4-7, na filtragem em atraso, emparelham todos os centroides do cenário DIRETO com o do REVERSO. Além disso na filtragem em azimuth desfazemos a dupla atribuição a um mesmo centroide, como está a acontecer com o R2, que é atribuído tanto a D2 como a D3. Depois também observamos que R3 emparelhava com D4 em atraso, mas não pode emparelhar em azimuth.

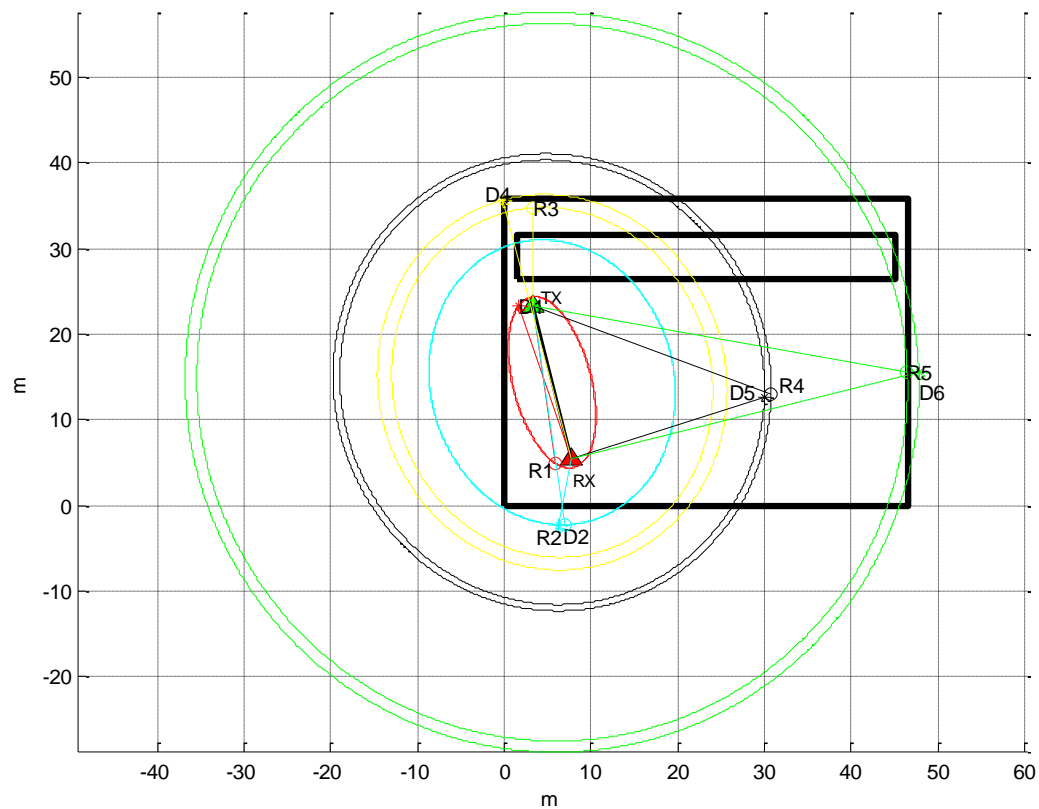


Figura 4.30 Gráfico elipses emparelhadas em atraso e azimute para o cenário 1 (DIRETO e REVERSO) com LOS. Depois de fazer um emparelhamento por atraso e azimute (Emparelhamento Perfeito em Atraso e em Azimute).

Como vemos na Figura 4.30, existem reflexões que claramente se estão a produzir em obstáculos (que podem ser as paredes) mas existem algumas como pode ser D5-R4, na qual a reflexão parece produzir-se no tecto como evidencia a análise da elevação dos centroides nas seguintes tabelas:

K	ATRASSO [ns]	AZIMUT [°]	ELEVAÇÃO [°]	POT.CENTROIDE [dB]	Nº MPCs
1	68,5	109,0	10,6	-61,5	12
2	111,7	-101,3	18,8	-67,4	10
3	112,7	60,4	37,4	-66,8	15
4	146,9	104,8	23,3	-71,8	11
5	173,7	17,9	26,7	-72,7	11
6	288,2	14,3	4,3	-76,2	5

Tabela 4-8 Resumo das características dos centroides do cenário 1 (DIRETO) com LOS.

K _{rv}	ATRASSO [ns]	AZIMUT [°]	ELEVAÇÃO [°]	POT.CENTROIDE [dB]	Nº MPCs
1	68,2	-81,7	9,0	-61,9	12
2	112,1	-81,8	31,1	-64,5	26
3	137,0	89,6	26,1	-73,1	8
4	178,6	-20,6	26,1	-73,0	16
5	279,5	-10,1	10,5	-74,8	8

Tabela 4-9 Resumo das características dos centroides do cenário 1 (REVERSO) com LOS.

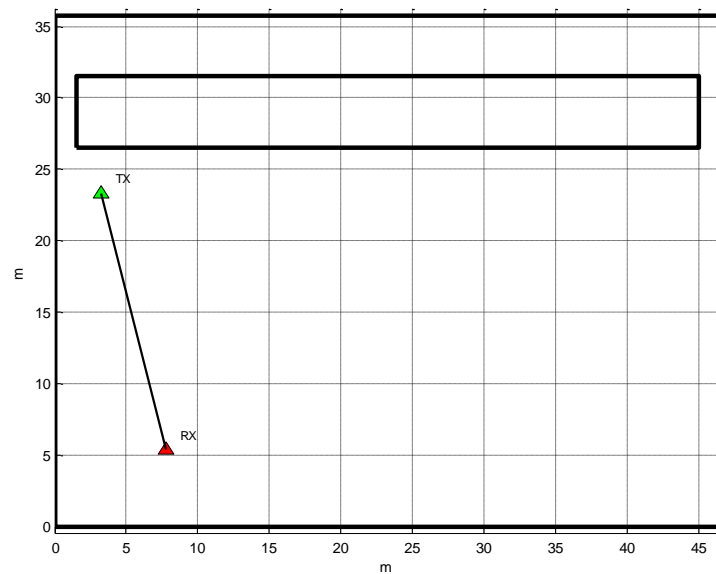


Figura 4.31 Gráfico elipse emparelhadas em atraso e não em azimuth para o cenário 1 (DIRETO e REVERSO) com LOS. Depois de fazer um emparelhamento por atraso e azimuth (Emparelhamento em Atraso e Não Perfeito em Azimuth). Finalmente representam-se aqueles centroides que não conseguiram emparelhar em atraso e azimuth ou foram rejeitadas por existir mais de uma atribuição, Figura 4.32.

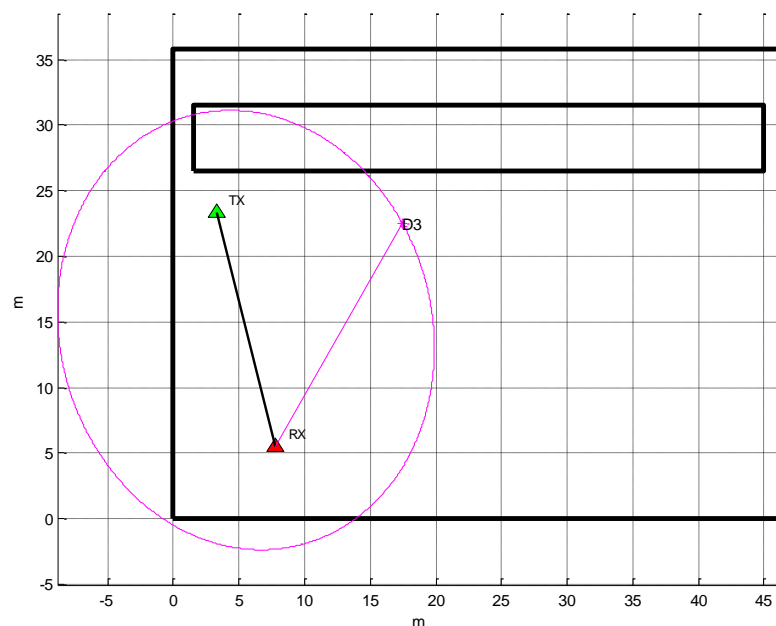


Figura 4.32 Gráfico elipse desemparelhadas em atraso e em azimuth para o cenário 1 (DIRETO e REVERSO) com LOS. Depois de fazer um emparelhamento por atraso e azimuth.

4.4.2 Representação mediante elipses para o cenário interior-exterior

Como foi dito anteriormente no cenário que vamos representar não existe linha de vista entre o transmissor e o recetor. Na Figura 4.34 temos uma representação de todos os raios correspondentes às medidas feitas no percurso DIRETO e no REVERSO. Aplicando as distintas filtragens, obtemos os seguintes resultados representados na Tabela 4-10.

FILTRAGEM POR ATRASO (inter [-10ns 10ns])		FILTRAGEM POR AZIMUT	
EMPARELHADOS POR ATRASO DESEMPARELHADOS		EMP. NÃO PERFEITOS NÃO EMPARELHADOS	
DEREITO	REVERSO	DEREITO	REVERSO
1	1	2,4	3
2			
3	2		2
4			3
5	4		4

Tabela 4-10 Resultados dos emparelhamentos das elipses para o cenário2, depois de aplicar as filtragens em atraso e azimuth.

Como podemos observar na Figura 4.33 existem elipses com o mesmo atraso. Nalgumas elipses o azimuth coincide o que sugere que nestes casos temos uma reflexão de 1ª ordem: estas são as contribuições que aparecem na Figura 4.37.

Como se pode observar na Figura 4.36 R3-D4 não emparelhava em atraso mas ao fazer a filtragem por azimuth, decidimos incluí-la no grupo de emparelhamentos PERFEITOS em atraso e azimuth, pois pode ser que não coincidam em atraso, devido a erros de posicionamento do carrinho das medições.

O cenário2 no seu exterior apresenta árvores que nesta representação não foram indicadas as quais podem produzir reflexões. Também há que ter em conta a circulação de pessoas e automóveis nas proximidades.

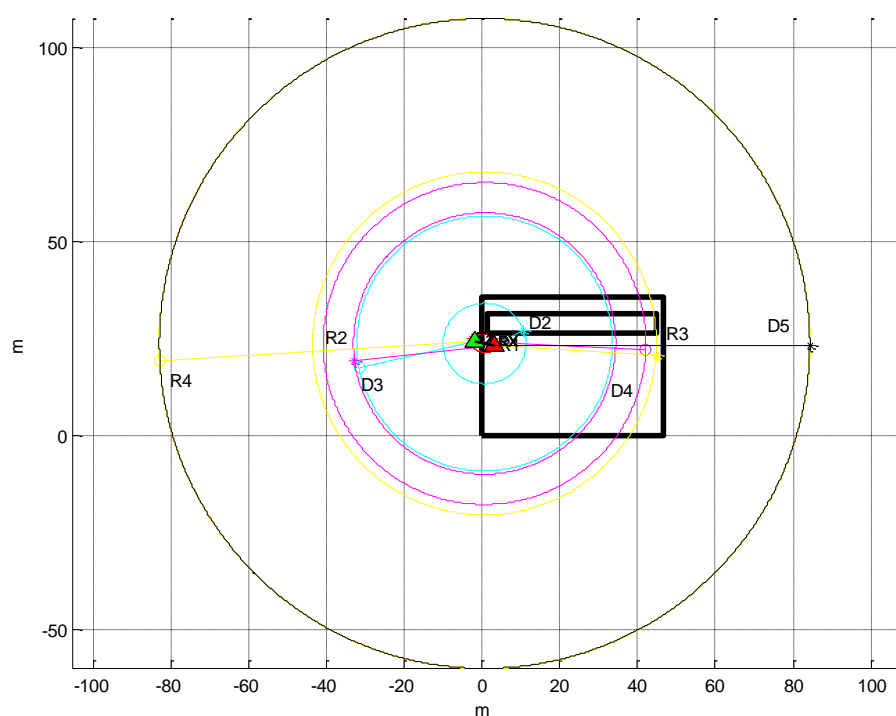


Figura 4.34 Gráfico Elipses cenário 2 (DIRETO e REVERSO) com NLOS para $K=5$ e $K_{rv}=4$.

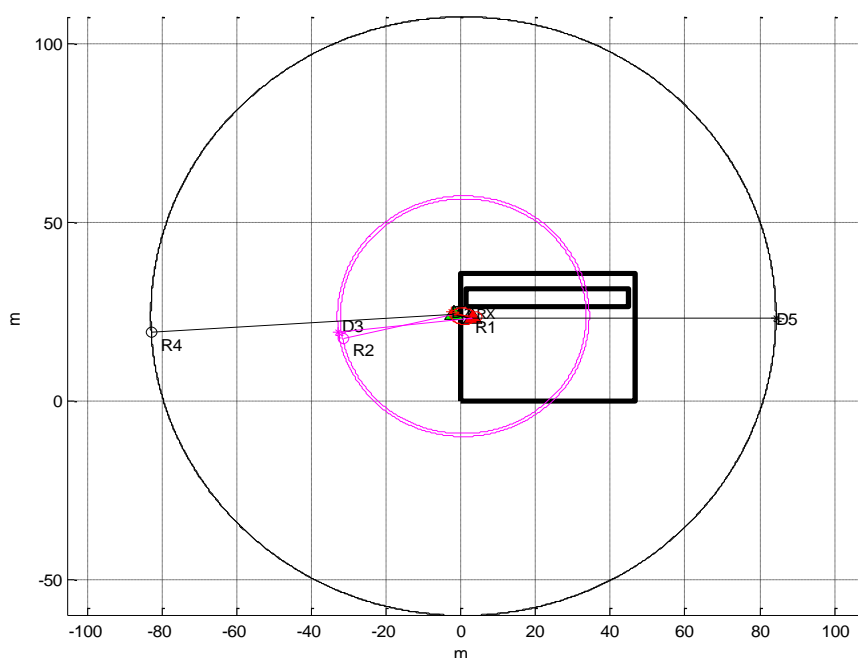


Figura 4.35 Gráfico elipses cenário 2 (DIRETO e REVERSO) com NLOS. Depois de fazer um emparelhamento por atraso.

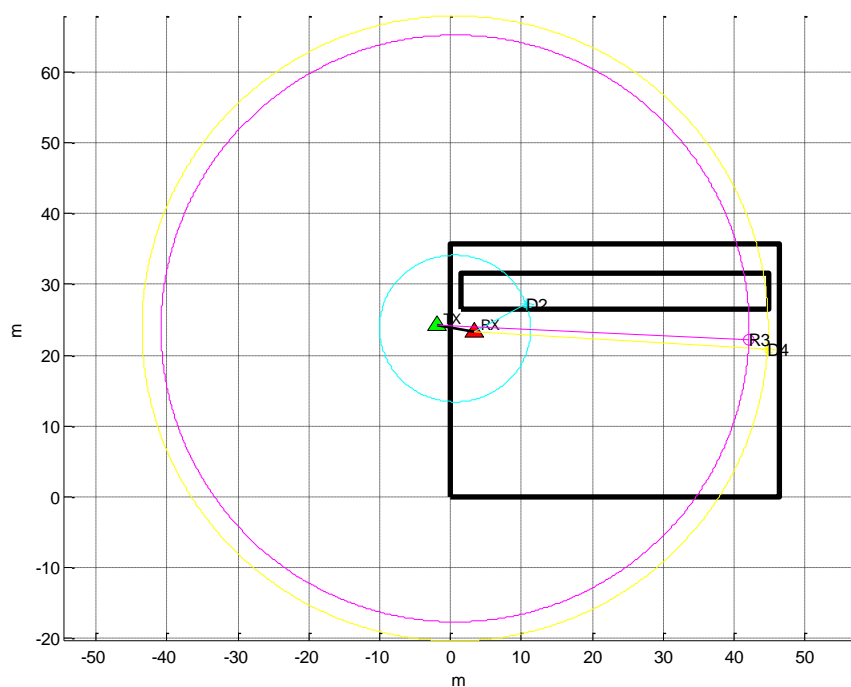


Figura 4.36 Gráfico elipses desemparelhadas em atraso para o cenário 2 (DIRETO e REVERSO) com LOS. Depois de fazer uma filtragem por atraso.

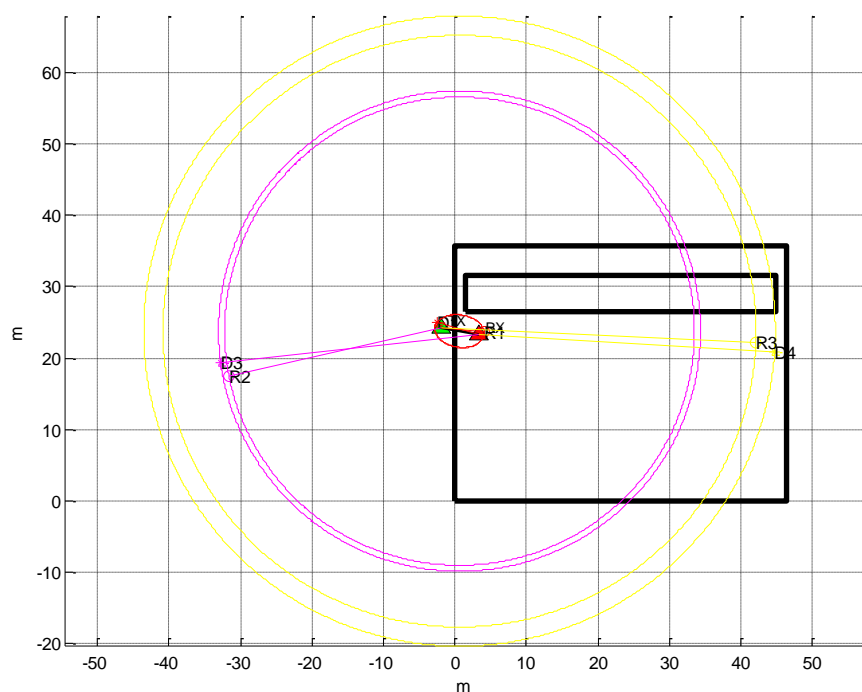


Figura 4.37 Gráfico elipses emparelhadas em atraso e azimuth para o cenário 2 (DIRETO e REVERSO) com NLOS. Depois de fazer um emparelhamento por atraso e azimuth (Emparelhamento Perfeito em Atraso e em Azimute).

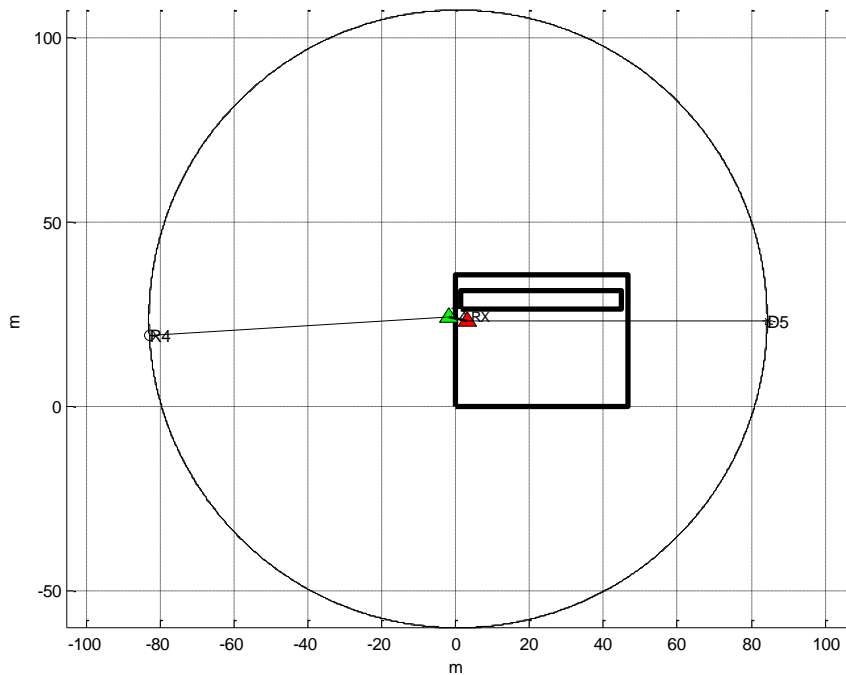


Figura 4.38 Gráfico elipses emparelhadas em atraso e não em azimuth para o cenário 2 (DIRETO e REVERSO) com NLOS. Depois de fazer um emparelhamento por atraso e azimuth (Emparelhamento em Atraso e Não Perfeito em Azimute).

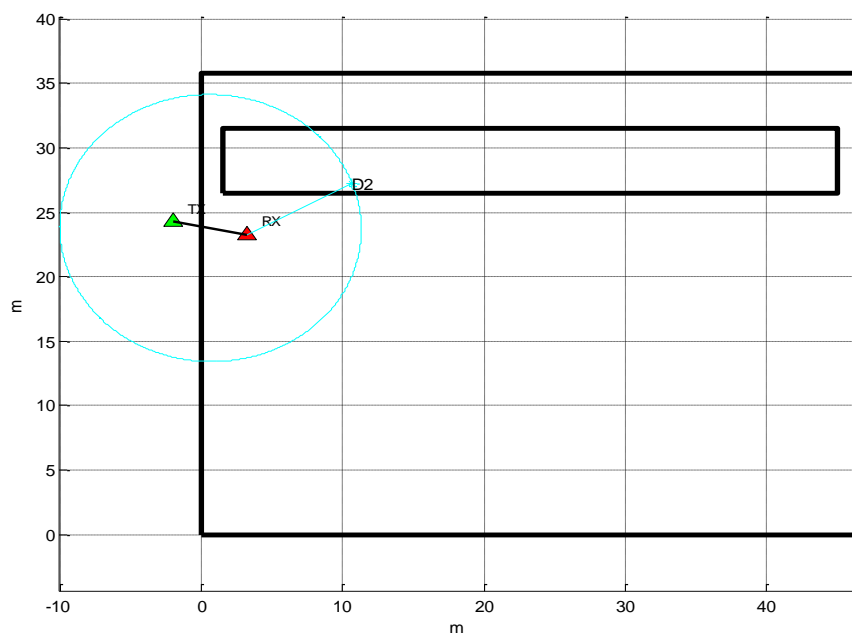


Figura 4.39 Gráfico elipses desemparelhadas em atraso e em azimuth para o cenário 2 (DIRETO e REVERSO) com NLOS. Depois de fazer um emparelhamento por atraso e azimuth.

Na Figura 4.38, vemos como existe um emparelhamento perfeito em atraso, mas em azimute não coincide com o esperado para uma reflexão de 1ª ordem. Neste caso é muito provável que se esteja a produzir uma reflexão de 2ª ordem.

K	ATRASSO [ns]	AZIMUT [°]	ELEVAÇÃO [°]	POT.CENTROIDE [dB]	Nº MPCs
1	23,2	164,2	7,7	-57,2	24
2	71,2	28,0	32,9	-76,7	8
3	224,9	-173,9	5,6	-78,3	10
4	294,7	-3,39	11,0	-81,6	6
5	557,7	0,0	10,3	-92,5	1

Tabela 4-11 Resumo das características dos centroides do cenário 2 (DIRETO) com N LOS.

K	ATRASSO [ns]	AZIMUT [°]	ELEVAÇÃO [°]	POT.CENTROIDE [dB]	Nº MPCs
1	23,3	-6,1	19,7	-58,8	38
2	219,3	-167,1	0,0	-78,3	5
3	276,7	-2,6	11,8	-80,6	9
4	558,2	-176,5	6,9	-91,8	1

Tabela 4-12 Resumo das características dos centroides do cenário 2 (REVERSO) com NLOS.

5. Estudos posteriores

Neste capítulo faz-se um resumo de alguns estudos que foram começados durante a elaboração deste projeto e também de alguns estudos posteriores que poderiam ser feitos como trabalho futuro e de continuação deste projeto.

Como já foi apresentado na secção 4.4, conseguimos determinar e classificar as reflexões que se estavam a produzir nos distintos cenários. Na última fase da dissertação começámos os estudos da análise dos parâmetros fundamentais que caracterizam os *clusters* para a criação dum modelo.

Na secção 5.1 iremos representar resultados de forma gráfica onde analisamos o azimute, o atraso e a potência dos *clusters* e as MPCs. Desta forma poderemos determinar parâmetros que estão relacionados e tentar assim num futuro estabelecer um modelo que caracterize a propagação em ambientes interiores e interiores-extteriores.

Na secção 5.2 analisamos a resolução do FD-SAGE, já que o algoritmo apresenta alguns problemas respeitantes à resolução na estimação de parâmetros. O problema reside no facto do FD-SAGE estimar parâmetros que se encontram num atraso menor que aquele a que corresponde o raio direto entre o Tx e o RX. A partir da deteção deste erro, detalham-se algumas soluções propostas para solucionar esta anomalia e alguns desenvolvimentos que se fizeram.

5.1 Estudo do comportamento do atraso, da potência e do azimute para os *clusters* e para as MPCs

Para a criação dum modelo que possa caracterizar o canal rádio, baseado na estimação das componentes principais mediante o FD-SAGE, e o posterior agrupamento em *clusters*, é necessário fazer um estudo sobre o atraso, o azimute e a potência dos raios.

Nesta secção parte deste estudo foi começado e apresentam-se alguns resultados obtidos com base nos resultados experimentais explicados em detalhe anteriormente.

Para a escrita desta parte foram apenas detalhados dois cenários. Na realidade tomaram-se medidas em dez cenários colocando-se o TX e o RX em posições distintas. Tendo em conta todas as medidas explicamos os resultados obtidos e que detalham as características em azimuth, atraso e potência que apresentam os *clusters*.

- **Análise do Azimute normalizado para as MPCs:**

Recorrendo a um histograma do azimuth normalizado das MPCs, queremos extrair conclusões sobre entre que valores varia a separação dos centroides em relação às MPCs em termos de azimuth. O cálculo do azimuth normalizado, não é um parâmetro que o FD-SAGE devolva, mas este foi calculado subtraindo ao azimuth de cada MPC, o azimuth do centroide calculado com o KPM.

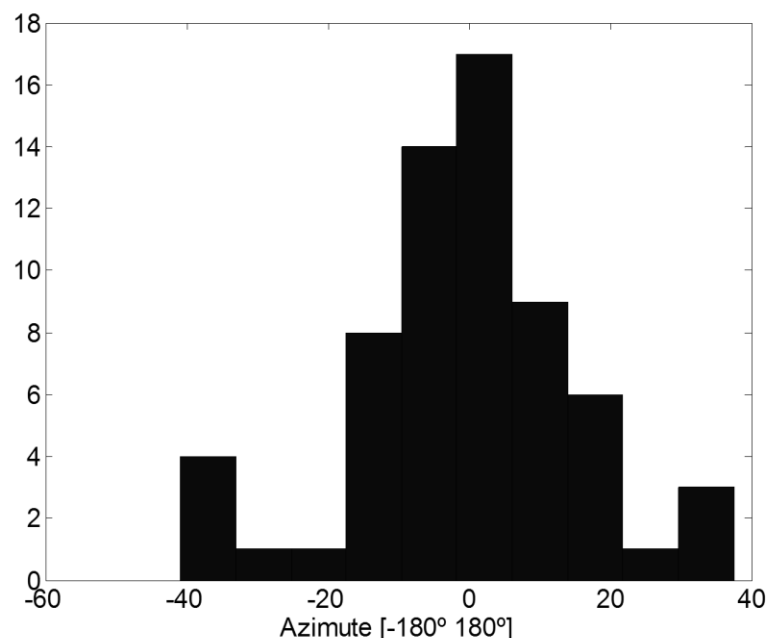


Figura 5.1 Histograma do azimuth normalizado para cenário 1 (DIRETO) com LOS.

- **Análise do Atraso normalizado:**

Recorrendo a um histograma do atraso normalizado das MPCs, queremos extrair conclusões sobre entre que valores varia a separação dos centroides em relação às MPCs em termos de atraso.

O cálculo do atraso normalizado não é um parâmetro que o FD-SAGE devolva mas este foi calculado subtraindo ao atraso de cada MPC, o atraso do centroide calculado pelo KPM.

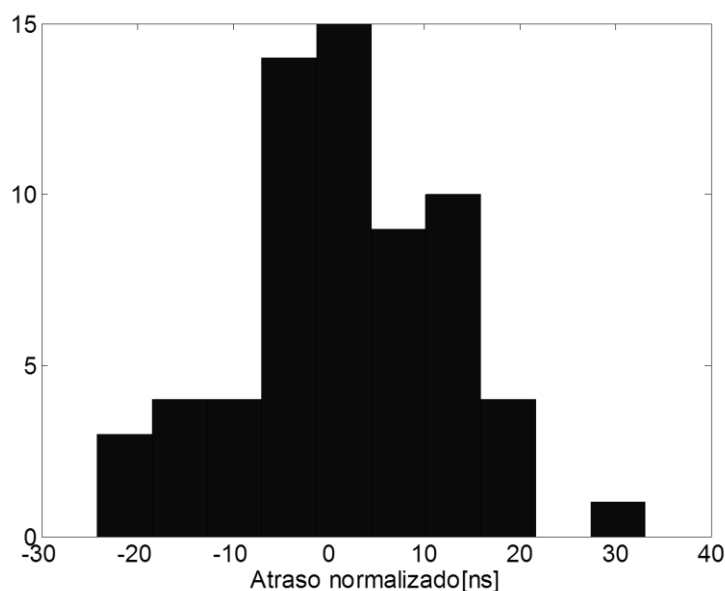


Figura 5.2 Histograma do atraso normalizado para cenário 1 (DIRETO) com LOS.

- **Análise da potência dos centroides versus respetivo atraso:**

Através da representação gráfica destes parâmetros, queremos observar a tendência que apresenta a potência dos centroides para distintos valores do atraso. Tentamos determinar se podemos extrair como conclusão que os centroides que têm um atraso maior têm também potências mais baixas. A potência do centroide não é um parâmetro por si mesmo, mas pode ser calculado como sendo a soma da potência das MPCs associadas a um *cluster*.

Como observamos na Figura 5.3 existe uma tendência semelhante a um decaimento exponencial. Como vemos os *clusters* com atrasos maiores têm uma potência mais baixa. Este fenómeno, além de fisicamente ser esperado, é característico para todos os ensaios feitos com combinações diferentes das posições do TX e RX e também o resultado é independente do cenário ser LOS ou NLOS. Este resultado esperado é lógico pois às MPCs que têm um atraso maior correspondem-se os raios que percorreram caminhos mais longos (eventualmente com interações adicionais) e portanto chegam com menor amplitude ao recetor.

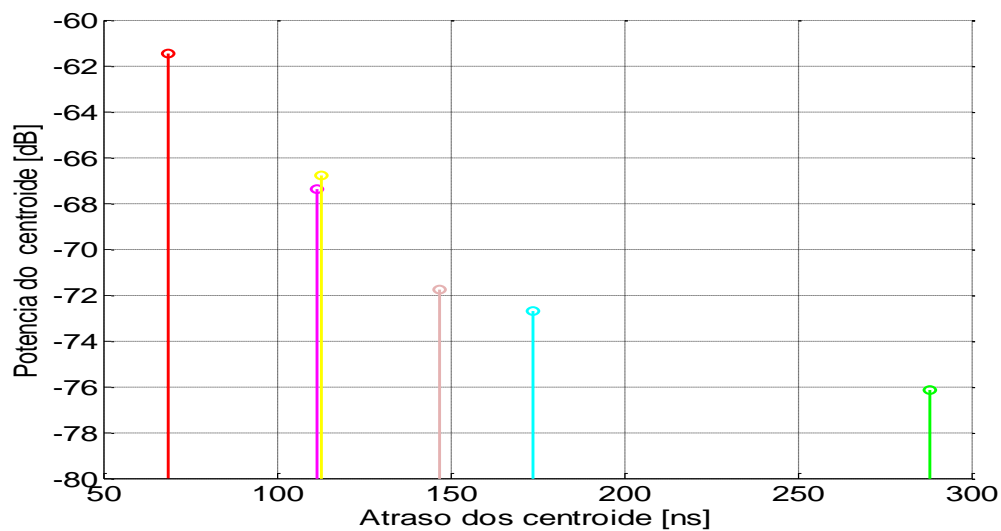


Figura 5.3 Potência dos centroides vs. Atraso dos centroides, para o cenário 1 (DIRETO) com LOS.

- Análise do *cluster* que contem o raio direto:

A Figura 5.4 representa o *cluster* que contém o raio direto para um cenário em que existe LOS. Desta forma analisamos o espalhamento das MPCs relativas ao centroide. Estamos a representar a potência das MPCs que foi normalizada em relação à potência do centroide (somatório da potência das MPCs pertencentes ao *cluster*) em função do atraso normalizado.

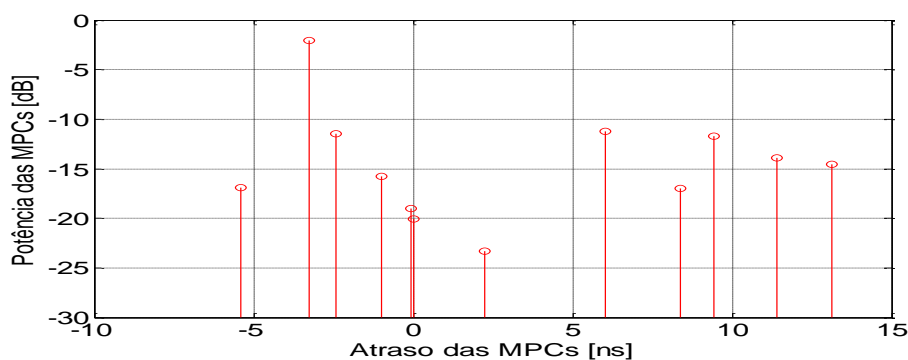


Figura 5.4 Gráfico do *cluster* que contém o raio direto, representa-se a potência das MPCs vs. Atraso normalizado das MPCs para o cenário 1 (DIRETO) com LOS.

- Análise dos raios dos restantes *clusters*:

Como vemos na Figura 5.5, estamos a representar o espalhamento de todas as MPCs (excepto as que pertencem ao *cluster* do raio direto). Para isto colocamos a potência de cada MPC normalizada relativamente à potência do centroide em função do atraso normalizado. Os raios pertencentes a um mesmo *cluster* têm a mesma cor.

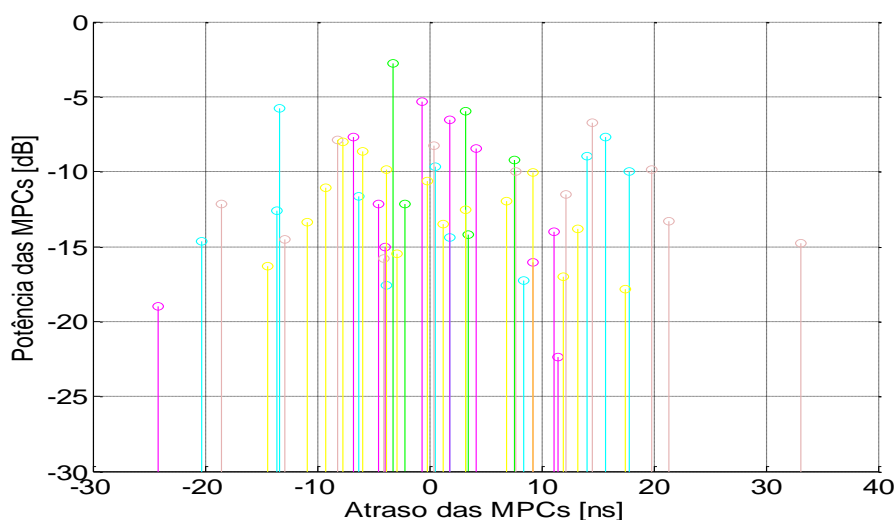


Figura 5.5 Gráfico de todos os *clusters* exceto o *cluster* que contém o raio direto, representa-se a potência das MPCs vs. Atraso normalizado das MPCs para o cenário 1 (DIRETO DIRETO) com LOS.

Estudo do número de MPCs associadas a cada *cluster* em função do atraso normalizado máximo:

A representação da Figura 5.6, permite-nos estudar o número de MPCs associadas a cada *cluster* em função do máximo atraso normalizado em cada cluster o qual nos facilita avaliar a dispersão em atraso que acumula cada *cluster*.

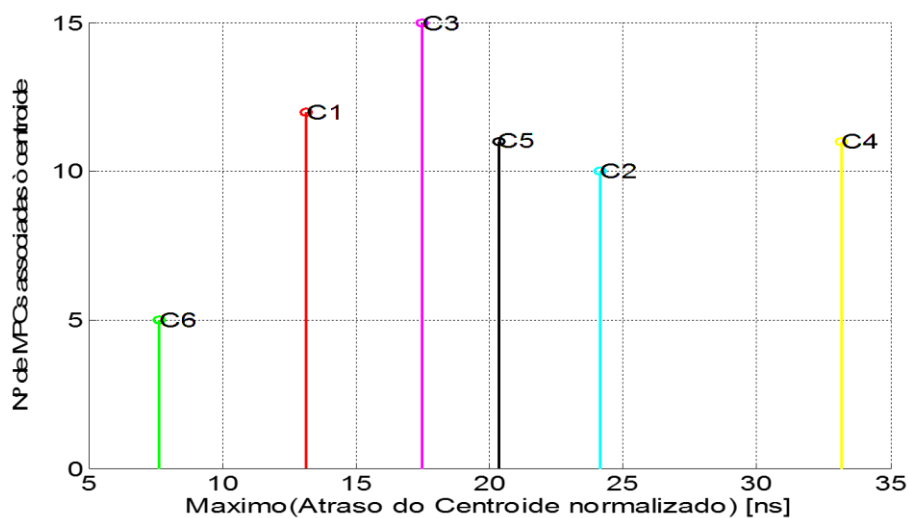


Figura 5.6 Gráfico do Nº de MPCs associadas a cada *cluster* em função do máximo do atraso do centroide normalizado para o cenário1 (DIRETO) com LOS.

Estudo do número de MPCs associadas a cada *cluster* em função do atraso do centroide:

Na Figura 5.7 representamos o número de MPCs que foram associadas a cada *cluster* em função do atraso que apresenta o centroide de cada *cluster*. Isto permite-nos observar se existe alguma relação entre o atraso e o número de componentes pertencentes ao *cluster*.

Observando o gráfico, podemos ver que os centroides que têm mais MPCs associadas situam-se em atrasos menores. MPCs que chegam com atrasos muito grandes chegam com potências mais baixas que as outras não sendo eventualmente detetadas ou mesmo o algoritmo SAGE pode ter dificuldade em as recuperar.

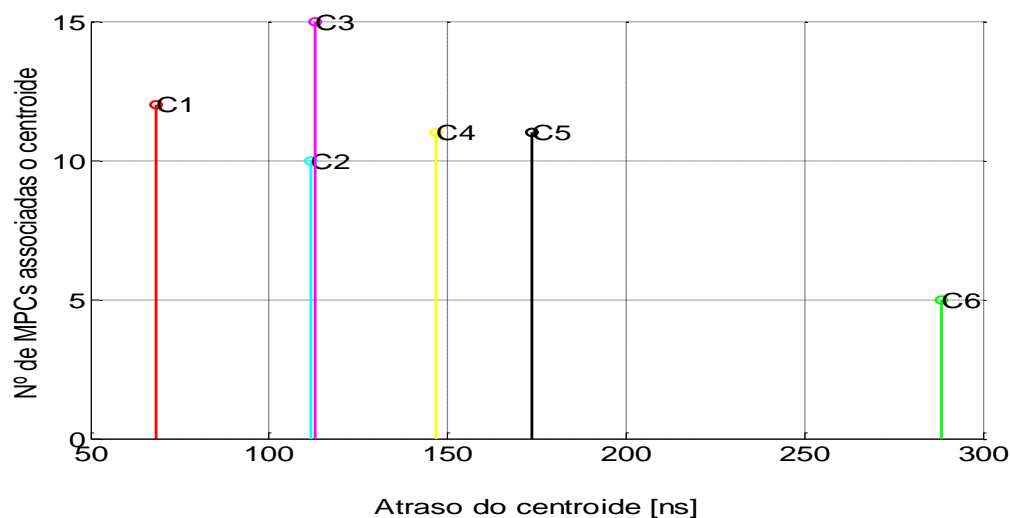


Figura 5.7 Gráfico do Nº de MPCs associadas a cada *cluster* em função do atraso do centroide para o cenário1 (DIRETO) com LOS.

5.2 Resolução do SAGE para os casos com LOS e NLOS

Detetou-se através da representação gráfica, que o FD-SAGE estima parâmetros com algumas limitações e especialmente alguns para atrasos menores que o apresentado pelo raio direto tanto nos casos em que temos LOS como também nos casos em que não temos NLOS. Isto provavelmente pode dever-se também às limitações da fonte do analisador de redes, calibração imperfeita, reflexões junto à plataforma, etc.

Qualquer algoritmo deste tipo apresenta sempre resultados que dificilmente encaixam na visão simplista que temos do canal: estacionário, com reflexões especulares, índice de refração dos materiais independente da frequência, etc.

Num cenário como o seguinte, Figura 5.8, em que temos NLOS, o atraso correspondente ao raio direto é: **36ns** tendo em conta as coordenadas do Tx-Rx.

Como vemos na Figura 5.9 e na Figura 5.10, o FD-SAGE estima componentes com atraso inferior àquele que apresenta o raio direto. Estes valores, como é logico, não são aceitáveis e deveriam ser eliminados para que assim o algoritmo de clustering KPM, calcule de forma mais correta o tamanho dos clusters e a distribuição dos mesmos.

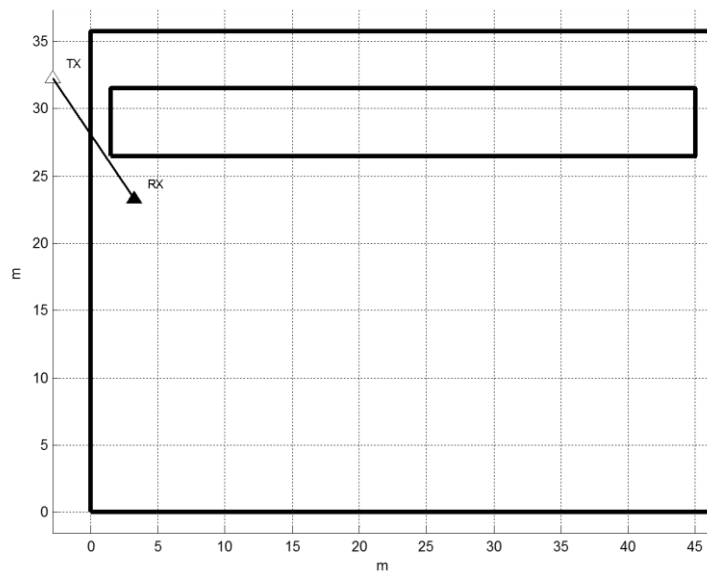


Figura 5.8 Cenário no que o FD-SAGE tem problemas de estimação.

De qualquer forma, tendo em conta como o KPM designa os *cluster*, estas estimativas com atraso inferior à do raio direto, não têm um valor de amplitude muito elevado relativamente ao resto de componentes que apresentam atrasos semelhantes, o qual significa que apenas existiram câmbios, na distribuição e na quantidade de *clusters* representativos do cenário.

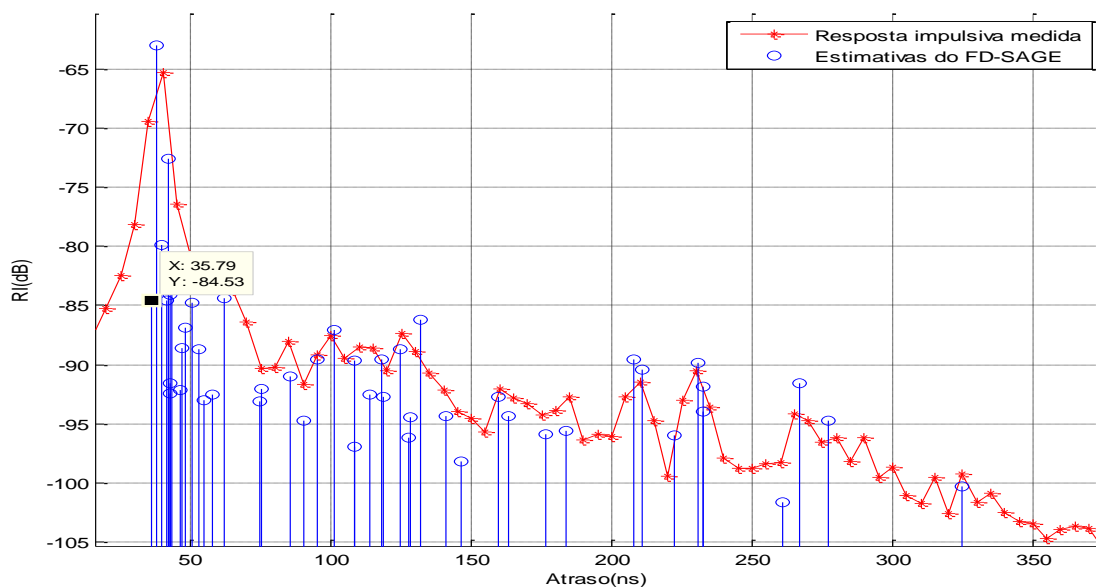


Figura 5.9 Resposta impulsiva e estimativas do FD-SAGE, com problemas de resolução cenário (DIRETO).

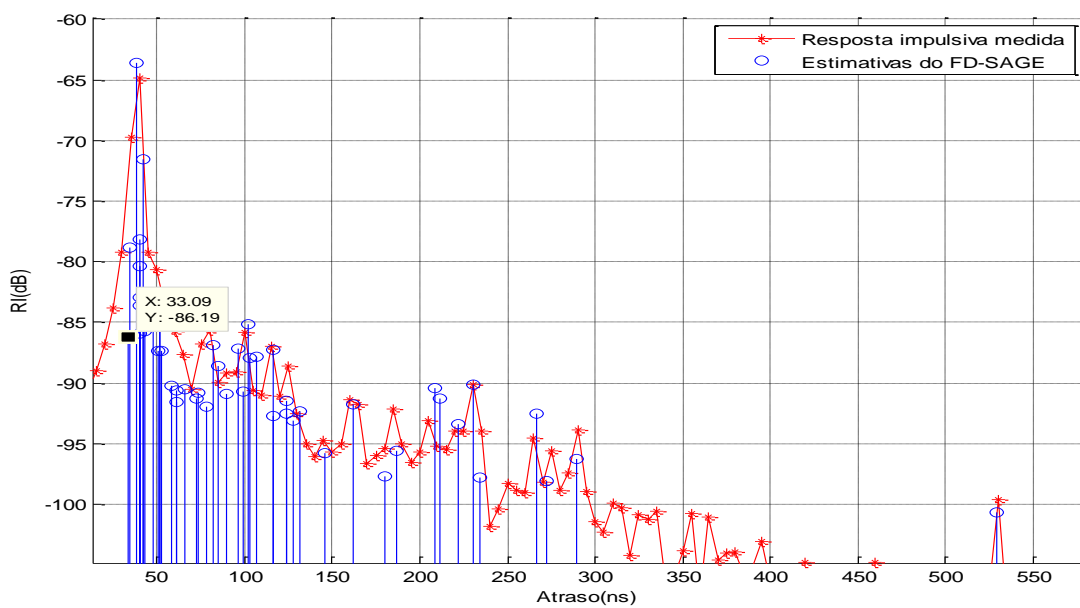


Figura 5.10 Resposta impulsiva e estimativas do FD-SAGE, com problemas de resolução cenário (REVERSO).

6. Conclusões

Este trabalho consistiu em fazer um estudo sobre a identificação de *scatters* em ambientes interiores e interiores-extteriores, a partir de medições SIMO.

Fazendo uso de algoritmos de elevada resolução como o FD-SAGE para a estimação dos parâmetros do canal rádio direcional e utilizando algoritmos de *clustering* como o KPM e medidas de validação para o *clustering*, conseguimos determinar fisicamente os lugares onde se estão a produzir reflexões e a classificação das mesmas.

A primeira parte do projeto centrou-se em gerar dados que simulem o canal rádio direcional de forma sintética para determinar o bom desempenho das medidas de validação para o *clustering*.

As conclusões que extraímos, observando os resultados obtidos na secção 3.4.3, é que nem todos os índices de validação apresentados obtêm resultados satisfatórios e estáveis com a variação do número de *clusters*. Seleccionámos finalmente os índices de validação seguintes: XB, D53.

Na segunda parte do projeto decidimos aplicar as ferramentas seleccionadas a cenários reais (Pavilhão de desporto da Universidade de Aveiro) nos quais se realizaram medidas SIMO, utilizando o sistema de medição detalhado na secção 4.1. Os dados foram explorados com o algoritmo FD-SAGE e obtiveram-se o atraso, o azimute, a elevação e a amplitude complexa de cada raio que chega ao recetor.

De seguida usou-se um algoritmo de agrupamento como é o KPM e que apareceu detalhado na secção 3.2, para assim trabalhar com centroides que representam MPCs que têm características similares. Depois as medidas de validação seleccionaram o número de *clusters* que representavam melhor a distribuição das MPCs. Tendo em conta estes resultados, e através de uma inspeção visual, decidimos atribuir um valor final ao número de *clusters*.

Utilizando ferramentas gráficas [32], representamos os raios que chegaram ao recetor e de seguida aplicamos uma filtragem em atraso (sem necessidade de supervisão) e uma filtragem em azimuth. Desta forma conseguimos classificar as reflexões em 1ª ordem e reflexões de 2ª ordem ou superiores.

Finalmente com o objetivo de criar um modelo que represente as medidas feitas em ambientes interiores e interiores-exteiores -respeitando as relações existentes entre os diversos parâmetros como o atraso e o azimuth- representamos graficamente o atraso e o azimuth em relação à potência dos *clusters*, analisando a sua semelhança com distribuições já conhecidas.

Pode considerar-se que o objetivo desta tese alcançado com resultados satisfatórios, já que conseguimos situar as reflexões produzidas nos cenários interiores e interiores-exteiores e classificá-las em 1ª ordem ou outras ordens superiores.

Como trabalho futuro sugere-se a criação dum modelo que caracterize o comportamento dos *clusters* e das MPCs em termos de azimuth, atraso e potência.

No respeitante à elevação poder-se-ia estudar a sua influência na criação dos *clusters*, já que neste trabalho esse parâmetro não foi tido em conta.

Por fim, seria interessante repetir as medidas com um sistema MIMO, para poder comparar com previsões do modelo extraído. A caracterização de mais cenários poderia melhorar a caracterização estatística dos parâmetros determinados.

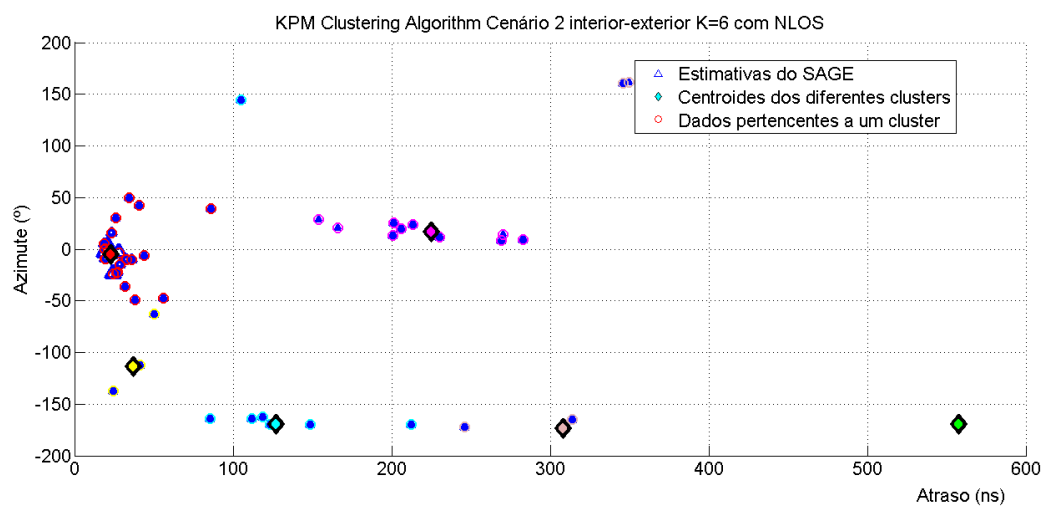
Referências

1. Balanis, C.A., *Antenna Theory, Analysis and Design*. John Wiley & Sons. .
2. Mota, S., *Caracterização do Canal de Propagação Direccional em Banda Larga para Sistemas Rádio Móvel*. 2003.
3. García, M.O., *Caracterização direccional do canal rádio* Dissertação de Mestrado, Departamento de Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, 2009.
4. Mota, S., et al. *Clustering of the multipath radio channel parameters*. in *Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on*. 2011.
5. Saleh, A.A.M. and R. Valenzuela, *A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 1987. 5(2): p. 128-137.
6. Rousseeuw, P.J.K., *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Wiley, 1990.
7. Rábanos, J.M.H., *Transmisión por radio*. Ed. Ramón Areces, 2008.
8. Cheng, D.K., *Fundamentals of engineering electromagnetics* Addison-Wesley.
9. Rappaport, T., *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2001.
10. www.radio-electronics.com.
11. Rábanos, J.M.H., *Comunicaciones Móviles*. Ed. Ramón Areces, 2004.
12. Proakis, J.G., *Digital Communications*. Mc Graw-Hill. 4th Edition.

13. Espiñeira, F.P.F.a.P.M., *Modeling the Wireless Propagation Channel: A Simulation Approach with MATLAB*. Wiley, 2008.
14. Parsons, D., *The Mobile Radio Propagation Channel*. Pentech Press, 1992.
15. Almers, P., et al., *Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007. 2007.
16. Cover, T.M., *Elements of Information Theory*. John Wiley and sons, 1991.
17. Gesbert, D., et al., *From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2003. 21(3): p. 281-302.
18. Shannon, C.E., *A Mathematical Theory of Communication*. The Bell System Technical Journal, July, October, 1948. Vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
19. Spencer, Q.H., et al., *Modeling the statistical time and angle of arrival characteristics of an indoor multipath channel*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2000. 18(3): p. 347-360.
20. Hurley, K.K.a.P., *Estimation of the Number of Clusters Using Multiple Clustering Validity Indices*. Proc. MCS, 2010: p. pp.114-123.
21. Mota, S. and A. Rocha. *Parameter estimation of synthetic and real radio channels using THF SAGE algorithm*. in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on*. 2002.
22. S. Mota, M.O.G., A. Rocha, F. Perez-Fontan, *Estimation of the Radio Channel Parameters using the SAGE Algorithm* RADIOENGINEERING, DECEMBER 2010. VOL. 19, NO. 4.

23. A.K Jain, M.N.M., P.J FLYNN, *Data Clustering: A Review*. ACM Computing Surveys,, September 1999. Vol. 31, No. 3.
24. Pakhira, M.K., S. Bandyopadhyay, and U. Maulik, *Validity index for crisp and fuzzy clusters*. Pattern Recognition, 2004. 37(3): p. 487-501.
25. Wang, W. and Y. Zhang, *On fuzzy cluster validity indices*. Fuzzy Sets and Systems, 2007. 158(19): p. 2095-2117.
26. N. Czink, e.a., *Automatic clustering of MIMO channel parameters using the multi-path component distance measure*. Proc. WPMC'05.
27. Czink, N., et al. *A Framework for Automatic Clustering of Parametric MIMO Channel Data Including Path Powers*. in *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*. 2006.
28. Zhang, Y., et al., *A cluster validity index for fuzzy clustering*. Information Sciences, 2008. 178(4): p. 1205-1218.
29. Xie, X.L. and G. Beni, *A validity measure for fuzzy clustering*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1991. 13(8): p. 841-847.
30. Maulik, U. and S. Bandyopadhyay, *Performance evaluation of some clustering algorithms and validity indices*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2002. 24(12): p. 1650-1654.
31. Bezdek, J.C. and N.R. Pal, *Some new indexes of cluster validity*. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, 1998. 28(3): p. 301-315.
32. www.mathworks.com.

Anexo



Figura_Anexo 1. Cenário 2 interior-exterior, K=6 com NLOS.